



Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

Wilinton Estiven Arenas Fonnegra

Informe final de proyecto de investigación  
Requisito para optar al título de Ingeniero Químico

Asesoras:

Adriana Marcela Osorio Correa – Doctora en Ingeniería  
Laura Colorado Arango – Magíster en ingeniería de materiales.

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Química  
Medellín, Colombia  
2022.

Cita	Arenas Fonnegra [1]
<b>Referencia</b>	[1] W. E. Arenas Fonnegra, “Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.”, Proyecto de investigación, Ingeniería Química, Universidad de Antioquia, Medellín, 2022.
Estilo IEEE (2020)	



Procesos Físicoquímicos Aplicados - PFA



**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** Jhon Jairo Arboleda Céspedes.

**Decano/Director:** Jesús Francisco Vargas Bonilla.

**Jefe departamento:** Lina María González Rodríguez.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Agradecimientos**

Agradezco a mi madre por todo el apoyo a lo largo de mi vida, quien siempre fue mi impulso para seguir, la que me ha permitido trazar mi camino y caminar con mis propios pies.

Mi profundo agradecimiento a mis asesoras, las profesoras Adriana Marcela Osorio Correa y Laura Colorado por haberme brindado la oportunidad de desarrollar este proyecto bajo su orientación, por sus conocimientos, todo su apoyo, asesoría y colaboración. No solo un gran conocimiento, sino también una comprensión y empatía sin las que el proyecto no hubiera sido posible. Ustedes formaron parte importante de esta historia con sus aportes profesionales que las caracterizan.

A todas los integrantes que hacen parte del grupo de investigación Procesos Físicoquímicos Aplicados - PFA, por confiar en mí, por la enseñanza, por abrirme las puertas y permitirme realizar todo el proceso investigativo dentro de sus instalaciones.

Gracias a la Universidad de Antioquia la cual siempre seguirá siendo mi segunda casa porque me acogió y siempre dispuso de múltiples espacios para el aprendizaje lo cual ayudó a transformarme para ser una mejor persona y profesional.

Y por último muchas gracias a mis amigos, vecinos y futuros colegas que me ayudaron de una manera desinteresada, por todos los momentos que pasamos juntos, por todas las tareas que realizamos y por haber hecho de mi etapa universitaria un trayecto de vivencias que nunca olvidaré.

¡Que nadie se quede afuera, se los dedico a todos!

## CONTENIDO

1.	RESUMEN.....	11
2.	ABSTRACT .....	12
3.	INTRODUCCIÓN.....	13
4.	OBJETIVOS.....	15
4.1.	Objetivo general .....	15
4.2.	Objetivos específicos.....	15
5.	MARCO TEÓRICO .....	16
5.1.	La técnica de la molienda .....	16
5.2.	Molino de bolas.....	16
5.3.	Elementos importantes en la molienda.....	18
5.3.1.	Velocidad Crítica .....	18
5.3.2.	Relaciones entre los Elementos Variables.....	20
5.3.3.	Volumen de Carga.....	20
5.3.4.	Potencia .....	20
5.3.5.	Tipos de Molienda: húmeda y seca .....	21
5.4.	Ultrasonido.....	22
5.5.	Consumo energético de ultrasonido .....	23
5.6.	Mecanismo de fractura .....	23
5.7.	Rotura por impacto.....	24
5.8.	Fractura por compresión.....	25
5.9.	Fractura por abrasión.....	25
5.10.	Rotura por desgaste.....	26
5.11.	Cinética de molienda.....	27

5.11.1.	Velocidad específica de fractura.....	27
5.12.	Estudios previos de pretratamiento con ultrasonido en procesos de molienda .....	28
5.13.	Modelo Gates-Gaudin-Schuhmann (G-G-S).....	33
5.14.	Modelo Rosin-Rammler (R-R).....	33
6.	METODOLOGÍA.....	34
6.1.	Consulta, revisión y análisis bibliográfico.....	34
6.2.	Selección y caracterización del material.....	34
6.3.	Coeficiente de uniformidad ( $Cu$ ) .....	35
6.4.	Coeficiente de curvatura ( $Cc$ ).....	36
6.5.	Determinación de condiciones de operación .....	37
6.6.	Preparación de muestras .....	39
6.7.	Ensayos ultrasonido.....	39
6.8.	Secado de material pretratado .....	41
6.9.	Descripción molino de bolas.....	42
6.10.	Determinación de fracción de llenado .....	42
6.11.	Ensayos molienda .....	44
6.12.	Caracterización Granulometría.....	45
6.13.	Obtención de monotamaños .....	46
6.14.	Preparación de la pulpa .....	46
6.15.	Determinación de velocidades específicas de fractura .....	47
7.	RESULTADOS Y DISCUSIONES. ....	48
7.1.	Selección y caracterización del material.....	48
7.2.	Determinación de condiciones de operación. ....	51
7.3.	Consumo energético en ultrasonido .....	54
7.4.	Velocidades Específicas de Fractura ( $S_j$ ).....	54

8. CONCLUSIONES ..... 63

9. REFERENCIAS ..... 64

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1. Comparación de la molienda húmeda con la molienda en seco.....	21
TABLA 2. Parámetros y condiciones molienda en seco y húmedo.....	38
TABLA 3. Parámetros y condiciones para determinación de velocidad específica de fractura con y sin exposición a ultrasonido.....	38
TABLA 4. Especificaciones del molino.....	44
TABLA 5. Caracterización del material.....	50
TABLA 6. Reporte de energía consumida en los ensayos de ultrasonido.....	54
TABLA 7. Valores obtenidos en ensayo para la determinación de la velocidad específica de fractura de la muestra blanco.....	55
TABLA 8. Valores obtenidos en ensayo para la determinación de la velocidad específica de fractura de la muestra con pretratamiento de ultrasonido.....	58
TABLA 9. Velocidades específicas de fractura de muestra blanco, muestra asistida por ultrasonido en (min <sup>-1</sup> ) y % de mejora.....	60

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Molino de bolas. ....	17
Figura 2. Especificación grafica de la velocidad crítica. ....	19
Figura 3. Variación de la potencia respecto al volumen de carga. ....	21
Figura 4. Espectro de partículas en el proceso de trituración. ....	24
Figura 5. Espectro de partículas en el proceso de fractura por compresión. ....	25
Figura 6. Diferentes modos de una partícula fracturada. a) Desgate. b) Abrasión. ....	26
Figura 7. Tipos diferentes de curvas granulométricas. ....	37
Figura 8. Muestra de caliza preparada. ....	39
Figura 9. ELMA ULTRASONIC LC30H. ....	40
Figura 10. Ultrasonido cargado con material. ....	41
Figura 11. Horno y material secado. ....	41
Figura 12. Serie de tamices utilizados en la caracterización granulométrica. ....	45
Figura 13. Histograma granulometría de alimento. ....	48
Figura 14. Análisis granulométrico correspondiente al alimento. ....	49
Figura 15. Modelo Gates-Gaudin-Schuhmann para muestra de alimento. ....	50
Figura 16. Análisis granulométrico diferencial para el blanco y muestras con pretratamiento de ultrasonido de 2.5 y 10 minutos con molienda en seco. ....	51
Figura 17. Análisis granulométrico acumulado para el blanco y muestras con pretratamiento de ultrasonido de 2.5 y 10 minutos con molienda en seco. ....	52
Figura 18. Análisis granulométrico diferencial para el blanco y muestras con pretratamiento de ultrasonido de 2.5 y 10 minutos con molienda en húmedo. ....	52
Figura 19. Análisis granulométrico acumulado para el blanco y muestras con pretratamiento de ultrasonido de 2.5 y 10 minutos con molienda en húmedo. ....	53
Figura 20. Cinética de fractura de primer orden para monotamaño 10/14 para muestra blanco. ...	56



Figura 21. Cinética de fractura de primer orden para monotamaño 14/16 para muestra blanco. ...	56
Figura 22. Cinética de fractura de primer orden para monotamaño 16/20 para muestra blanco. ...	57
Figura 23. Grafica de primer orden para diferentes monotañanos para la molienda de las muestras blanco.....	57
Figura 24. Cinética de fractura de primer orden para monotamaño 10/14 para muestra expuesta a ultrasonido.....	58
Figura 25. Cinética de fractura de primer orden para monotamaño 14/16 para muestra expuesta a ultrasonido.....	59
Figura 26. Cinética de fractura de primer orden para monotamaño 16/20 para muestra expuesta a ultrasonido.....	59
Figura 27. Grafica de primer orden para diferentes monotañanos para la molienda de las muestras asistida con ultrasonido.....	60
Figura 28. Comparación del comportamiento de la velocidad especifica de fractura de las muestras blanco y las muestras asistidas con ultrasonido. ....	61

## SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

<b>CaCO<sub>3</sub></b>	Carbonato de calcio.
<b>C<sub>c</sub></b>	Coefficiente de curvatura.
<b>C<sub>p</sub></b>	Fracción en peso de los sólidos en la mezcla.
<b>C<sub>u</sub></b>	Coefficiente de uniformidad.
<b>C<sub>v</sub></b>	Fracción de sólido en volumen en la mezcla.
<b>G-G-S</b>	Modelo Gates-Gaudin-Schuhmann.
<b>kHz</b>	Kilohercio.
<b>kPa</b>	Kilopascal.
<b>L</b>	Litro.
<b>Min</b>	Minuto.
<b>Mm</b>	milímetros.
<b>PFA</b>	Procesos fisicoquímicos aplicados.
<b>Rpm</b>	Revoluciones por minuto.
<b>S<sub>j</sub></b>	Velocidades Específicas de Fractura.
<b>R-R</b>	Modelo Rosin-Rammler.
<b>W</b>	Watt.
<b>% p/p</b>	Porcentaje peso-peso.
<b>μm</b>	Micrómetros.

---

## 1. RESUMEN

En los últimos años los métodos de pretratamiento para los procesos de reducción de tamaño han cobrado relevancia, teniendo en cuenta que tanto trituración y molienda son en su mayoría procesos intensivos y por tanto la energía consumida representa más de la mitad del consumo total en las mismas; podría ser de gran utilidad encontrar alternativas que permitan una disminución en consumo energético de dichos procesos. Es por este motivo que se estudió un proceso de molienda asistido con ultrasonido para determinar la velocidad específica de fractura utilizando un molino de acero inoxidable con potencia de 240 W y frecuencia ultrasónica constante de 35 kHz para observar la incidencia en la fractura y molturabilidad del material de estudio, en este caso, roca caliza.

Se realizaron pruebas experimentales a muestras expuestas a ultrasonido y sin exponer, para comparar su incidencia en molienda en húmedo y en seco y así determinar cuáles son las condiciones óptimas en el proceso. Se logró evidenciar que los mejores resultados en la determinación de la velocidad específica de fractura se obtienen con un tiempo de 10 minutos de exposición y molienda en húmedo. Las moliendas se realizaron por duplicado en tiempos de 0.5, 1, 2, y 3 minutos y los resultados obtenidos de este estudio muestran que el tratamiento mediante ondas ultrasónicas mejora entre un 0,55 y 4,49 por ciento la tasa de rotura, concluyendo que el tratamiento ultrasónico es capaz de ayudar en la trituración de minerales aumentando la velocidad específica de fractura.

***Palabras clave*** — Caliza, velocidad específica de fractura, molienda, molino de bolas, ultrasonido.

---

## 2. ABSTRACT

In recent years, pretreatment methods for size reduction processes have gained relevance, taking into account that both crushing and grinding are mostly intensive processes and therefore the energy consumed represents more than half of the total consumption; it could be very useful to find alternatives that allow a reduction in the energy consumption of these processes. It is for this reason that an ultrasound-assisted grinding process was studied to determine the specific fracture rate using a stainless steel mill with a power of 240 W and a constant ultrasonic frequency of 35 kHz to observe the incidence of fracture and the material's grind ability under study, in this case, limestone. Experimental tests were carried out on samples exposed to ultrasound and without exposure, to compare their incidence in wet and dry grinding and thus determine the optimal conditions in the process. It was possible to show that the best results in the determination of the specific fracture rate are obtained with a time of 10 minutes of exposure and wet grinding. The grindings were carried out in duplicate at times of 0.5, 1, 2, and 3 minutes and the results obtained from this study show that the treatment using ultrasonic waves improves the breakage rate between 0.55 and 4.49 percent, concluding that ultrasonic treatment is capable of helping in the crushing of minerals by increasing the specific fracture rate.

***Keywords* — Limestone, specific fracture rate, grinding, ball mill, ultrasound.**

---

## INTRODUCCIÓN

La caliza es una roca que, al igual que el carbón y el hierro, ha sido el eje del desarrollo minero e industrial de Colombia con reservas superiores a los 200 millones de toneladas, que abastecerán por muchos años el consumo interno, representando cerca del 80 % en la manufactura del cemento y el 20 % restante se utiliza ampliamente en numerosos procesos, sobre todo en las industrias siderúrgica, ornamental y agrícola; sin embargo, su exploración y su explotación se han efectuado de acuerdo con la demanda del mercado y su localización estratégica. Hoy en día existe gran cantidad de información dispersa, distribuida en diferentes entidades y empresas en todo el país, por lo que se carece de datos actualizados sobre sus yacimientos, recursos, reservas, calidad, usos, demanda, exportaciones e infraestructura, entre otros aspectos, que le permitan al gobierno trazar políticas de manejo de este importante recurso mineral [1].

Debido a que la caliza es un mineral de origen natural obtenido con diferentes tamaños de partículas, una amplia diversidad de efectos físicos, características mecánicas y químicas diferentes. Es necesario la reducción de tamaño donde se utiliza generalmente la molienda en molino de bolas que es un importante proceso tecnológico. Las aplicaciones de los molinos de bolas son omnipresentes en minerales, industria de procesamiento y minería, metalurgia, producción de cemento, industria química, productos farmacéuticos y cosméticos, cerámica, diferentes tipos de estudios de laboratorio y pruebas. Además de la reducción del tamaño de partículas, los molinos de bolas también se usan ampliamente para mezclar, mezcla y dispersión, amorfización de materiales y aleación mecánica [2].

El alto despilfarro descontrolado de energía ha atraído la atención de investigadores e industrias a nivel mundial; a raíz de las crecientes demandas de energía en todo el mundo, son frecuentes las fluctuaciones en los precios de la energía y aumento del calentamiento global. Entonces, para abordar el grave problema del consumo de energía sin restricciones, varios expertos a nivel mundial llevaron a cabo investigaciones rigurosas para desarrollar métodos alternativos y novedosos de transformación en polvo. Estos métodos pueden denominarse comúnmente como métodos de

Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

14

---

pretratamiento en el sentido de que las rocas están expuestas a algunos tipos de tratamiento antes de su trituración o molienda mecánica como lo son la rotura ultrasónica, el calentamiento por microondas, rotura de pulso de alto voltaje, entre otros. Siendo el principal objetivo del desarrollo de un método de pretratamiento el debilitar la resistencia mecánica de la roca antes de la trituración. Observando experimentalmente una fuerte disminución en el consumo de energía eléctrica en virtud del aumento en la capacidad de trituración y molienda de roca tratada [3].

En la industria donde se requieren tamaños de partícula muy finos es necesario el uso de molinos los cuales requieren grandes cantidades de energía lo que equivale a un gran impacto en la economía; conforme a ello se decide implementar un pretratamiento con ultrasonido al mineral con el objetivo final de que la rotura del material sea más sencilla y requiera menos energía al fracturarlo. Utilizando la velocidad específica de fractura calculada a partir del método de los monotamaños como manera de verificación de la incidencia del pretratamiento.

Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

15

---

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1. Objetivo general

Analizar las velocidades específicas de fractura de la caliza obtenidas a partir de la molienda asistida con ultrasonido.

#### 3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar la caliza en términos de sus propiedades individuales.
- Establecer las velocidades específicas de fractura de la caliza utilizando el método de los monotamaños.

---

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1. La técnica de la molienda

La operación de molienda consiste esencialmente en producir unidades de masa inferior, a partir de trozos más grandes, del material que se desea moler. Molturar es reducir un sólido a un estado de división avanzada. Esta operación es generalmente necesaria bien sea para el caso de obtener polvos de una cierta finura, bien para homogeneizar productos de orígenes diferentes, o bien para acelerar una reacción química, dando presencia a una o varias sustancias minerales o químicas. Por imposición de la naturaleza de la propia materia y por los tratamientos físicos y químicos que puedan seguir, la molienda o pulverización es a menudo una operación compleja, bajo su apariencia de simplicidad. En la operación de molienda es importante el tamaño en que se presenta el material que se desea molturar. Así, cuando la materia a tratar es de importante dimensión (bloques de cantera de 300 mm o más), se hace necesaria una operación previa de machaqueo, que consiste en reducir, en uno o dos pasos, la granulometría de los trozos a un tamaño medio de unos 15 mm, consistiendo a continuación la molienda propiamente dicha en reducir definitivamente los trozos obtenidos de la operación anterior a un polvo fino que pueda pasar en casi su totalidad por aberturas muy pequeñas; mallas de un tamiz cuya sección de paso sea sólo de algunas decenas de micras[4].

### 4.2. Molino de bolas

El molino de Bolas está formado por un cuerpo cilíndrico de eje horizontal, que en su interior tiene bolas libres. El cuerpo gira merced al accionamiento de un motor, el cual mueve un piñón que engrana con una corona que tiene el cuerpo cilíndrico. Las bolas se mueven haciendo el efecto “de cascada”, rompiendo el material que se encuentra en la cámara de molienda mediante fricción y percusión. El material para moler ingresa por un extremo y sale por el opuesto. Existen tres formas de descarga: por rebalse (se utiliza para



## Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

17

---

molienda húmeda), por diafragma, y por compartimentado (ambas se utilizan para molienda húmeda y seca)[4].

Siempre en un proceso de molienda, se buscan múltiples aspectos para llegar a una operación más eficiente del proceso, como son: reducir el consumo de energía, medios de molienda y desgaste de partes mecánicas, utilizar baja potencia, equipo compacto y simple, tener bajos costos de operación y mantenimiento, además de ciclos cortos de molienda-clasificación y por último ser un proceso controlable y de baja carga circulante. Todos los factores deben de manera armoniosa garantizar que la planeación de todo el sistema trabaje lo más cercano al plan estimado[5]. En la figura 1 se muestra el molino de bolas utilizado en la parte experimental.



*Figura 1. Molino de bolas.*

Existen dos maneras de cargar el molino las cuales son:

- Forma discontinua: cuando el molino se recarga de material y se cierra para hacerlo girar, al terminar la operación, el molino se abrirá para separar el mineral de los

## Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

18

---

medios de molienda. Esta forma de trabajar se utiliza en molinos pequeños de laboratorio[5].

- Forma continua: El molino se alimenta de forma continua por un extremo y simultáneamente se va descargando el mineral molido por el otro extremo (o por el centro según el caso). La operación únicamente se detendrá para trabajos de mantenimiento o recarga de los medios de molienda; aunque esto no siempre es así, ya que existen sistemas de carga continua y que se vierten junto con la pulpa sin necesidad de parar el equipo en operación. En la industria minera y agregados pétreos, se trabaja de forma continua[5].

### **4.3. Elementos importantes en la molienda**

Existe una serie de elementos importantes que influyen en la molienda de los materiales. Estos son:

- Velocidad Crítica.
- Relaciones entre los elementos variables de los molinos.
- Volumen de carga.
- Potencia.
- Tipos de Molienda: húmeda y seca.

#### **4.3.1. Velocidad Crítica**

Se define como velocidad crítica del molino a la velocidad de rotación a la cual las bolas empiezan a centrifugar en las paredes del molino y no son proyectadas en el interior del molino. En la figura 2 se muestran las diferentes opciones dependientes de la velocidad crítica. Haciendo un balance entre la fuerza de gravedad y la fuerza centrífuga sobre una bola en la pared del molino, la velocidad crítica resulta ser[6]:

Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

19

$$Velocidad\ crítica = \frac{42.2}{\sqrt{D - d}}$$

Ecuación 1

Donde D es el diámetro interno del molino y d es el diámetro máximo de las bolas ambos expresados en metros y la velocidad crítica esta expresada en revoluciones por minuto (rpm).

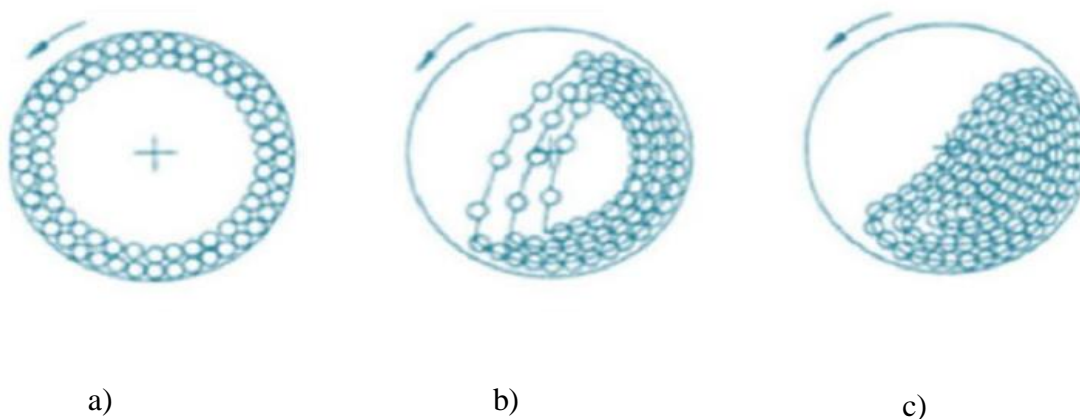


Figura 2. Especificación grafica de la velocidad crítica.  
Nota: Fuente <https://tinyurl.com/3h3wp6xm>

En la figura 2 a) la rotación en la parte interior del cilindro ocasiona que las bolas queden unidas en su pared interior y no se perpetré la molienda debido a la Fuerza Centrífuga. En la b) las bolas ascienden adheridas al cilindro hasta una altura en la cual su peso sobrepasa la fuerza centrífuga y caen al fondo de la cámara sobre el material y se produce un área de estallido del material cuando llega a la parte inferior y en la figura c) la rotación en la parte interior del molino, la velocidad es menor que en la anterior; de esta forma se da un efecto de abrasión y compresión entre el material y las bolas[5].

---

### **4.3.2. Relaciones entre los Elementos Variables**

El diámetro del molino, su velocidad, y el diámetro de los elementos molidores son los elementos variables del proceso. Teniendo en cuenta que en la molienda se emplean elementos molidores de distintos tamaños, las relaciones entre los elementos variables son[4]:

- A mayor diámetro de bolas, mayor es la rotura de partículas grandes (percusión).
- A menor diámetro de bolas, mayor es la molienda de partículas pequeñas por una mayor superficie de los elementos molidores (fricción).
- A mayor diámetro de bolas, mejora la molienda de material duro (percusión).
- Para igual molienda, a mayor diámetro del molino o mayor velocidad, menor el diámetro necesario de bolas.

### **4.3.3. Volumen de Carga**

Los molinos de bolas y barras no trabajan totalmente llenos. El volumen ocupado por los elementos molidores y el material a moler referido al total del cilindro del molino es lo que se denomina Volumen de Carga. Habitualmente es del 30% al 40%, y de este volumen, el material a moler ocupa entre una 30% a un 40% [4].

### **4.3.4. Potencia**

La potencia máxima se desarrolla cuando el volumen de carga es del 50% aproximadamente, sin embargo, generalmente se trabaja entre un 30% y un 40% ya que como la curva es bastante plana, la potencia entregada es similar a la del 50% [4]. En la figura 3 se muestra cual es la variación de la potencia respecto al volumen de carga.

## Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

21

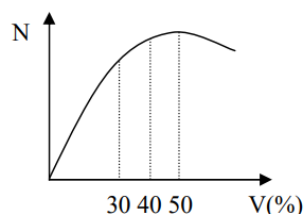


Figura 3. Variación de la potencia respecto al volumen de carga.  
Nota: Fuente <https://tinyurl.com/ycke7adp>

### 4.3.5. Tipos de Molienda: húmeda y seca

La molienda se puede hacer a materiales secos o suspensiones de sólidos en líquido (agua), el cual sería el caso de la molienda Húmeda. Es habitual que la molienda sea seca en la fabricación del cemento Portland y que sea húmeda en la preparación de minerales para concentración. En la molienda húmeda el material a moler es mojado en el líquido elevando su humedad, favoreciendo así el manejo y transporte de pulpas, que podrá ser llevado a cabo por ejemplo con bombas en cañerías. En la molienda húmeda moderna, luego del proceso de desintegración, la clasificación de partículas se llevará a cabo en hidrociclones y si se desea concentrar el mineral se podrá hacer una flotación por espumas. El líquido, además, tiene un efecto refrigerante con los calores generados en el interior[4]. En la tabla 1 se realiza una comparación de los tipos de molienda.

TABLA 1. Comparación de la molienda húmeda con la molienda en seco.

<b>Molienda Húmeda</b>	<b>Molienda Seca</b>
Requiere menos potencia por tonelada tratada	Requiere más potencia por tonelada tratada
No requiere equipos adicionales para el tratamiento de polvos.	Si requiere equipos adicionales para el tratamiento de polvos
Consumo más revestimiento (por corrosión).	Consumo menos revestimiento.

Nota: Fuente <https://tinyurl.com/ycke7adp>

---

#### **4.4. Ultrasonido**

El término “ultrasonido” se refiere a una serie de ondas mecánicas cuya frecuencia está por encima de la capacidad de audición del oído humano (mayor a los 20.000 ciclos por segundo o 20kHz). Desde el punto de vista de su aplicabilidad en diversos campos, ofrece ciertas ventajas: puede ser dirigido como un haz, cumple las leyes de reflexión y refracción, y puede ser reflejado por objetos de pequeño tamaño. Sin embargo, también tiene limitaciones: se propaga muy poco a través de medios gaseosos y la cantidad de energía acústica reflejada depende de las desigualdades acústicas del medio[7]. Las ondas ultrasónicas se producen cuando un campo eléctrico oscilante se aplica a un cristal piezoeléctrico que la convierte en vibración mecánica. La combinación de vibración mecánica y compresión ha demostrado ser una energía eficiente método, aunque sólo a escala de laboratorio. Material inherente a grietas cuando se sometieron a un tratamiento ultrasónico experimentaron un ensanchamiento de las grietas que pueden propagarse a la superficie exterior del material[3].

En la reunión de la Asociación Internacional de Investigación de Trituración, celebrada en Varsovia en 1993, se consideró que la viabilidad de la aplicación de energía ultrasónica al proceso de molienda era una vía viable de exploración e investigación. En la reunión se argumentaron varias razones diferentes para apoyar tal propuesta. Uno de los más convincentes se originó en el hecho aceptado de que dentro de cualquier material hay una serie de grietas inherentes y la energía ultrasónica tiene la capacidad de producir la propagación de grietas desde el interior de la partícula hacia su superficie exterior, produciendo una fractura eficiente. Además, en el caso de la molienda de minerales, este método sería cualitativamente mejor que la aplicación de esfuerzos externos, porque las fracturas se producirían en los límites naturales dentro de los compuestos materiales, impidiendo la rotura intercrystalina, fenómeno que produce nuevas sustancias, complicando el proceso de extracción[8].

---

#### 4.5. Consumo energético de ultrasonido

El consumo energético en los procesos de trituración, molienda, clasificación y remolienda, se encuentra estrechamente relacionado con el grado de reducción de tamaño alcanzado por las partículas en la correspondiente etapa de conminución, aun cuando la eficiencia energética de estos procesos rara vez supera el 10% del total de energía mecánica suministrada a los mismos. Lo anterior contextualiza la necesidad de establecer nuevas tecnologías o el uso de alternativas no convencionales que puede dar lugar a ahorros energéticos y económicos considerando la eficiencia energética de los respectivos equipos, además de facilitar su propia elección y proyectar su correcto dimensionamiento a escala industrial[9].

$$E_{US} = \frac{P_{US}t}{W_0} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

$E_{US}$ : Energía específica consumida por equipo de ultrasonido, en kJ/kg.

$P_{US}$ : Potencia de equipo de ultrasonido, en kW.

$t$ : Tiempo de exposición de pulpa en equipo de ultrasonido, en s.

$W_0$ : Carga de pulpa en equipo de ultrasonido, en kg.

#### 4.6. Mecanismo de fractura

Varios mecanismos contribuyen a la acción de molienda que tiene lugar dentro de un molino. Estos incluyen impacto o compresión, astillado y abrasión. Estos mecanismos deforman las partículas más allá de sus límites de elasticidad y hacen que se rompan. Los medios de bola son arrastrados en un movimiento de volteo que engendra algunas interacciones. Durante estas interacciones, los

medios chocan o ruedan entre sí. Según el tipo y la magnitud de la interacción, las partículas se rompen siguiendo un patrón determinado[10]. R.P. King (2001) argumentó que en un molino de bolas las partículas se rompen principalmente por impacto o trituración y desgaste. Sin embargo, parece que la rotura por impacto es predominante en tamaños de partículas más gruesos, mientras que el desgaste es la principal reducción del mecanismo en tamaños más finos. Entre los dos extremos, la rotura se compone de alguna combinación de impacto y abrasión[11].

#### 4.7. Rotura por impacto

Este mecanismo de fractura es inducido por la aplicación rápida de compresión estrés. Se produce un amplio espectro de tamaños de productos y este proceso es no selectivo múltiples procesos de fractura ocurren para que las partículas de la progenie sean inmediatamente sujeto a nuevas roturas por impactos sucesivos como se muestra en la figura 4 la fractura por impacto se produce cuando la energía aplicada es muy superior a la necesaria para la fractura. En estas condiciones, muchas áreas de la partícula están sobrecargadas y el resultado es un número comparativamente grande de partículas con un amplio espectro de tamaños[11].

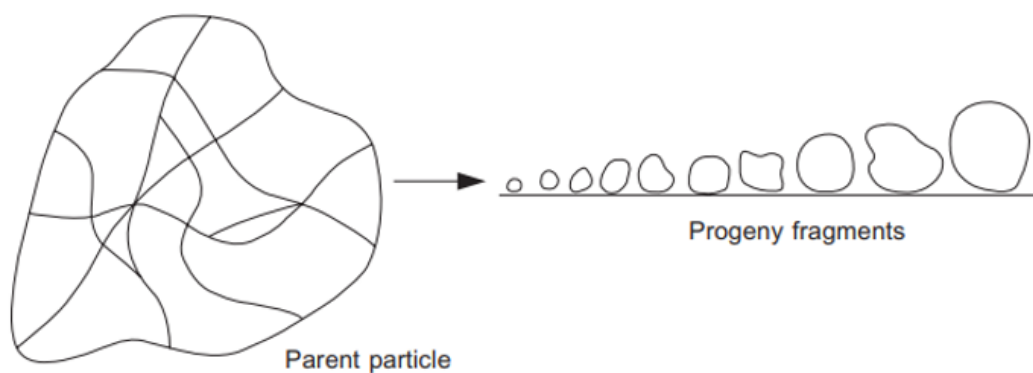


Figura 4. Espectro de partículas en el proceso de trituración.  
Nota: Fuente R. P. King, *Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems*, Butterworth. 2001.



#### 4.8. Fractura por compresión

R.P. King (2001) expuso este mecanismo de fractura y mostró que abarca fragmentación y escisión. La fractura por compresión ocurre cuando la energía aplicada es suficiente para cargar comparativamente pocas regiones de la partícula hasta el punto de fractura, y sólo unas pocas partículas resultan. El tamaño de la progenie es comparativamente cercano al tamaño de partícula original. Este tipo de fractura ocurre en condiciones de compresión lenta donde la fractura alivia inmediatamente la carga sobre la partícula[11]. En la figura 5 se muestra los fragmentos de la progenie formados a partir de la rotura por compresión.

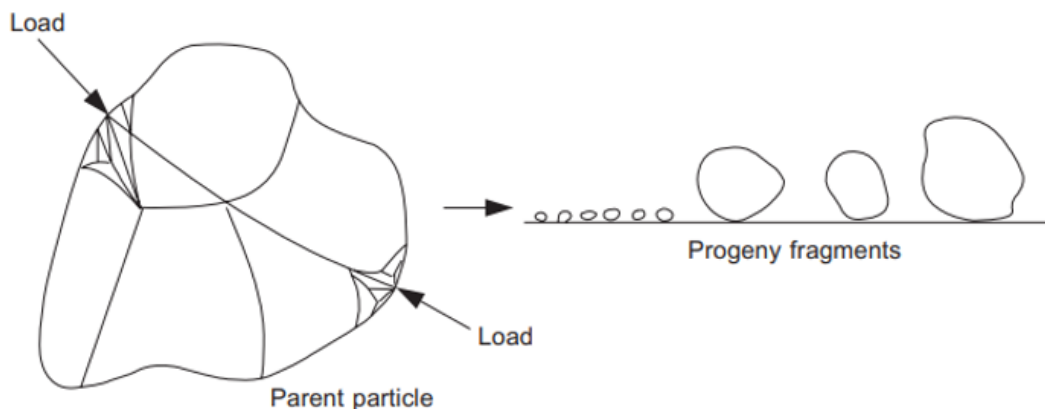


Figura 5. Espectro de partículas en el proceso de fractura por compresión.  
Nota: Fuente R. P. King, *Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems*, Butterwort. 2001.

#### 4.9. Fractura por abrasión

La abrasión es vista como un fenómeno superficial que tiene lugar cuando dos partículas se mueven paralelamente a su plano de contacto. Pequeños pedazos de cada partícula se rompen o son arrancados de la superficie como se observa en la figura 6, dejando las partículas originales prácticamente intactas. La fractura por abrasión ocurre cuando se aplica energía insuficiente para causar una fractura significativa de la partícula. Más bien, se produce una tensión localizada y se fractura un área pequeña para dar una distribución de partículas muy finas[10].

---

#### 4.10. Rotura por desgaste

Cuando un molino de bolas funciona a baja velocidad, la molienda es el resultado de la acción de frotamiento dentro de la masa de bolas y los revestimientos del molino. La reducción de tamaño depende principalmente de las áreas superficiales de los medios en interacción. Este mecanismo de rotura se conoce como desgaste. Es causado por el movimiento relativo entre el polvo y los componentes individuales de los medios de molienda en el molino. En el movimiento relativo de partículas y medios, partículas muy pequeñas resultan ser pellizcado entre bolas grandes o entre bolas grandes y revestimientos de molino. El roce juntos de los dos medios o de medios y revestimientos dará como resultado la producción de un número significativo de partículas muy finas en comparación con el tamaño original. Por esta razón, sería justo suponer que el desgaste es en gran medida responsable de la ruptura de Partículas que se han vuelto más pequeñas que los vacíos entre los medios de molienda y que las tensiones inducidas en la partícula cortada entre los dos medios y los revestimientos no son lo suficientemente grandes como para causar fracturas[10].

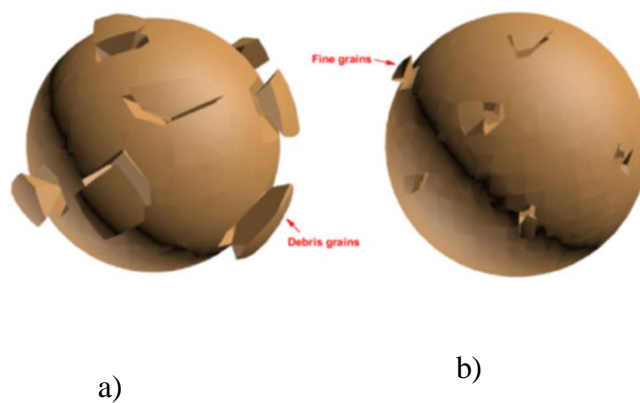


Figura 6. Diferentes modos de una partícula fracturada. a) Desgaste. b) Abrasión.

Nota: Fuente Y. Xiao et al., "Particle breakage and energy dissipation of carbonate sands under quasi-static and dynamic compression."

#### 4.11. Cinética de molienda

##### 4.11.1. Velocidad específica de fractura

Considere un molino discontinuo de laboratorio como si fuese un reactor bien mezclado que contiene una masa  $W$  de material en polvo, la que recibe una variedad de acciones de fractura cuando el molino está en operación. Si la alimentación inicial del molino está limitada a partículas dentro del intervalo de tamaño mayor, numerado como intervalo 1, entonces la condición inicial es  $w_1(0) = 1$ . Esta alimentación se muele por un intervalo de tiempo  $t_1$ , se muestrea el producto para determinar por tamizaje la fracción en peso que permanece en el intervalo de tamaño original y, retornando la muestra al molino, se continúa su operación por un intervalo de tiempo adicional  $t_2$ , repitiendo todo el procedimiento. Parecería razonable que la velocidad de desaparición de la masa de la fracción de tamaño 1 concuerde con una ley de primer orden, esto es[6]:

$$\frac{d[w_1(t)W]}{dt} \propto -w_1(t)W$$

Velocidad de desaparición de la masa de partículas de tamaño 1 por ruptura.

$\propto$

Masa de partículas de tamaño 1 presente en el molino en el tiempo  $t$ .

Como la masa retenida en el molino  $W$  es constante, resulta la ecuación.

$$\frac{dw_1(t)}{dt} = -S_1 w_1(t) \qquad \text{Ecuación 3}$$

Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

28

---

Donde  $w_1(t)$  representa la fracción de masa de material sin fracturar de tamaño 1 en el molino en el tiempo  $t$  y  $S_1$  es una constante de proporcionalidad que recibe el nombre de velocidad específica de fractura y tiene unidades de  $t^{-1}$ .

Después de realizar los procedimientos matemáticos necesarios (separar variables e integrar) para resolver la ecuación diferencial. Además, asumiendo cinética de orden uno se obtiene:

$$\text{Ln} \left( \frac{w_1}{w_0} \right) = -S_1 t \quad \text{Ecuación 4}$$

Cambiando de base el logaritmo se tiene:

$$\log \left( \frac{w_1}{w_0} \right) = -S_1 \log et \quad \text{Ecuación 5}$$

Debido a que el modelo de balance de población se basa en la ley de molienda de primer orden, es a veces denominado "modelo de tasa de primer orden". Todavía no está establecido en teoría por qué las partículas siguen esta ley. A pesar de su sencillez la ley ha demostrado aplicarse a numerosos materiales hasta ahora, especialmente para tamaños finos. Actualmente se están realizando investigaciones para obtener mucha información sobre la base de esta suposición. Pero hasta que eso se logre, el modelo es razonablemente bueno para muchos materiales en una amplia gama de operaciones[10].

#### **4.12. Estudios previos de pretratamiento con ultrasonido en procesos de molienda**

Se encontró en el estado del arte que el estudio de técnicas ultrasónicas utilizadas para el pretratamiento de materiales se ha realizado desde hace algunas décadas. Sin embargo, hay pocos estudios realizados con la caliza como material, por lo que se tuvo en cuenta estudios realizados a materiales similares con técnicas ultrasónicas los cuales son:

Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

- 
- Ríos, L. A., realizó un estudio con minerales sulfurados de cobre con alto contenido de carbón orgánico, el cual es sometido a un tratamiento de ondas ultrasónicas con el propósito de liberar las partículas ocluidas o débilmente liberadas por una capa de carbón. Considerando el tiempo de tratamiento ultrasónico, el pH del sistema, la adición de reactivos y el tamaño de las partículas como las variables más significativas. Los resultados obtenidos de este estudio muestran que el tratamiento mediante ondas ultrasónicas mejora entre un 4,2 y un 22,5 % la ley de cobre en concentrados y aumenta entre un 2,5 a un 14,9 % la recuperación de cobre en concentrados[7].
  - Toraman, O. Y., & İnal, H., investigaron la triturabilidad del polvo de calcita ( $D_{50} = 6,68 \mu\text{m}$ ) a partículas submicrónicas utilizando un molino de medios agitados (0,75 l) y generador ultrasónico (400 W, 24 kHz). El estudio se centra directamente en la trituración del polvo de calcita en medios acuosos mediante agitación combinada (molienda y tratamiento ultrasónico), algunos de los parámetros operativos de la molienda como el tiempo (10–30 min), potencia ultrasónica (40–100%  $\mu\text{m}$  como ajustes de amplitud) y relación sólida (10– 30% p/p) en trituración. Los resultados obtenidos por la combinación de molienda agitada en húmedo y sonicación son prometedores, pero también muestran que una mayor investigación sobre parámetros como el tiempo de tratamiento, la frecuencia y la temperatura del medio para la sonicación es necesaria para encontrar la sonicación óptima[13].
  - Vargas-Hernández, Y., Gaete-Garretón, L., Peña-Latorre, V., & et al., realizaron un experimento que consistía en la irradiación con ultrasonidos a soluciones de talco a diferentes concentraciones y distribuciones de tamaños de partículas, hasta obtener régimen cavitante. Se experimentó en cada concentración con diferentes tiempos de tratamiento para establecer la existencia de umbrales en los tiempos de exposición y concentración de partículas que maximizaran los efectos buscados. Se exploró con potencias ultrasónicas de 5, 10 y 15 W, irradiando a 23 kHz durante 10 minutos. Para mantener las partículas en suspensión en el primer experimento se utilizó un agitador magnético a 600 rpm. Se tomo una muestra de solución cada 10 minutos y se midió su distribución de tamaños, luego se aplicó una potencia acústica de 200 W a la solución

## Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

30

---

durante 1 minuto y se volvió a medir la distribución de tamaños cada 10 minutos. Cada vez que se aplica los ultrasonidos aparece un cambio en los radios de las partículas, que en algunos tamaños se reducen y en otros que crecen. Los resultados muestran la necesidad de continuar el estudio de los efectos de la cavitación sobre una población de partículas, en especial verificar si la distribución de tamaños afecta los resultados de la cavitación sobre la molienda[14].

- Gaete-Garretón, L. F., Vargas-Hermández, Y. P., & Velasquez-Lambert, C., experimentaron alimentando un molino y una máquina ultrasónica a (24,5 kHz) con distribuciones de diferentes tamaños de quark, un material quebradizo, con y sin activación ultrasónica. Los resultados fueron muy prometedores y mostraron que la calidad de la molienda se mantuvo sin cambios cuando el molino de rodillos de alta compresión se activó ultrasónicamente. Las distribuciones de tamaño en la máquina ultrasónica y en los molinos de bolas son aproximadamente las mismas. Sin embargo, el tiempo de procesamiento fue de 40 min para el molino de bolas y de sólo 1,85 min para la máquina ultrasónica. Además, la tasa de consumo de energía en la máquina ultrasónica fue de 6,8 kWh/ton, y para el molino de bolas, este valor aumentó a 20 kWh/ton. Las mejores condiciones de funcionamiento para el dispositivo ultrasónico se encuentran en niveles bastante bajos de potencias acústicas aplicadas, entre 10 y 30 W, pero incluso para una potencia aplicada de 400 W, todo el comportamiento del molino ultrasónico es aún mejor[8].
- Singh, V., Venugopal, R., Saxena, V. K., & Mukherjee, A. K. estudiaron muestras de minerales de carbón, hierro y manganeso fueron expuestas a diferentes intensidades ultrasónicas de 250, 300 y 350 W/L durante cinco minutos y a una intensidad ultrasónica de 270 W/L para diferentes duraciones de tiempo de 3, 5 y 7 minutos. Las muestras tratadas con ultrasonido mostraron reducciones en los diámetros de partículas  $D_{80}$  del 6 % para las muestras de carbón, 5,95 % para las muestras de mineral de hierro y 35,63 % para las muestras de mineral de manganeso durante la molienda. El tratamiento ultrasónico también fue observado para ayudar a reducir el contenido de cenizas en el producto de carbón en un 8 % y para reducir las pérdidas

## Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

31

---

de manganeso en los rechazos en aproximadamente un 5 %. Se concluyó que el tratamiento ultrasónico es capaz de ayudar en la trituración de minerales de tamaños finos[15].

- Gaete-Garretón, L., Vargas-Hernandez, Y., Chamayou, A., Dodds, J. A., & et al., realizaron un experimento sobre el efecto del ultrasonido en la rotura de bolas de cristal con una prensa neumática capaz de aplicar hasta 390 kPa la cual se equipó con un transductor ultrasónico. El transductor es del tipo cuerno escalonado, resonando a 20,4 kHz donde la fuerza aplicada se midió utilizando un manómetro de precisión. Los experimentos consistieron en romper cada una de las 25 bolas de vidrio de 4,5 mm individualmente en diferentes condiciones. El primer grupo se rompió sin activación ultrasónica, el segundo grupo se rompió con un ultrasónico aplicado de 35 W, y el último con una potencia ultrasónica aplicada de 70 W. El resultado de las pruebas en condiciones estáticas mostró una media fuerza de rotura de  $11,8 \times 10^6$  N/kg con desviación estándar de  $3,3 \times 10^6$  (28,2%), mientras que la prueba con ultrasonido mostró una fuerza de rotura media de  $4,8 \times 10^6$  N/kg con una desviación estándar de  $1,4 \times 10^6$  (29,1%). La dispersión relativa es la misma para ambas muestras, pero la fuerza de rotura bajo vibración ultrasónica es sólo el 40% de la fuerza de rotura media estática[16].
- Industrial Sonomecánica ha desarrollado un proceso de molienda húmeda ultrasónica de flujo continuo, que emplea ultrasonido de alta amplitud para reducir rápidamente el tamaño de las partículas de  $\text{CaCO}_3$  hasta el nivel requerido de  $d_{50} < 3 \mu\text{m}$ . El procesador BSP-1200 funciona a una frecuencia de 20 kHz y una amplitud de punta de 85  $\mu\text{m}$ . La muestra de predispersión de carbonato de calcio se preparó en un vaso de precipitados de 3 litros con dispersante Acumer 9400 y agua destilada en proporciones de 1% y 69 % en masa respectivamente.

Todos los componentes se mezclaron previamente en una placa de agitación magnética y se recircularon a través de la cámara del reactor ultrasónico, sin

## Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

32

---

sonicación, durante cinco minutos. Después de este paso, se inició la salida ultrasónica, exponiendo la suspensión que fluye a una cavitación acústica de alta intensidad. El tamaño medio de las partículas de  $\text{CaCO}_3$  se redujo ultrasónicamente de  $d_{50} = 20,32 \mu\text{m}$  a  $d_{50} = 1,33 \mu\text{m}$  en menos de 10 minutos y solo se usó un tercio de la cantidad de surfactante requerido por los procesos de molienda de bolas actuales, se obtuvieron resultados comparables y no se observó reaglomeración de partículas después de la sonicación. Este método es directamente escalable, no necesita medios costosos de acero o sílice, requiere cantidades reducidas de dispersante y puede lograr mayores tasas de productividad con requisitos de energía comparativamente más bajos que las técnicas empleadas actualmente[17].

- Singh, Veerendra., Dixit, Prashant., Venugopal, R., Venkatesh., & K. BhanuSe han realizado estudios a escala de laboratorio con  $< 2 \text{ kg}$  de peso de muestra con una densidad de suspensión de 0–20 %. Se han estudiado partículas de varios tamaños, pero  $-10 \text{ mm}$  resultó ser el rango de tamaño más preferido. Las pruebas han sido llevadas a cabo para ondas ultrasónicas de 14–25 kHz hasta 2kW de potencia y por 0–10 min de tiempo de tratamiento. Las materias primas comúnmente más estudiadas que utilizan esta técnica son carbón, mineral de cobre, hierro mineral y arena mineral[18].
- Adewuyi, Sefiu O., Ahmed, Hussin A.M., & Ahmed, Haitham M.A. En 1981, en conjunto con la empresa Energy and Mineral Research (EMR) y con el apoyo del Departamento de Energy (DOE) construyó un dispositivo ultrasónico consistente en un rodillo giratorio que tenía la capacidad de tratar 4,5–13,6 kg/h de mineral, con un requerimiento de energía de 3 kWh/t para el 80% del producto más fino que  $75 \mu\text{m}$ . En ese momento, el requerimiento de energía para lograr el mismo tamaño que usando un molino de martillos era 20 kWh/t. La principal desventaja del dispositivo, en comparación con la máquina convencional, era que tenía una capacidad de trituración muy baja[19].



---

#### 4.13. Modelo Gates-Gaudin-Schuhmann (G-G-S)

El modelo compara o relaciona los valores del porcentaje acumulado pasante  $F(x)$  con el tamaño de partícula o abertura de malla de la serie empleada. La ecuación del modelo matemático propuesto es el mostrado a continuación.

$$F(x) = 100 * \left(\frac{x}{k}\right)^a \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

$F(x)$ : Porcentaje en peso acumulado pasante por malla.

$X$ : Tamaño de partícula en micrones.

$k$ : Módulo de tamaño.

$a$ : Módulo de distribución.

#### 4.14. Modelo Rosin-Rammler (R-R)

El modelo Rosin-Rammler (R-R) compara o relaciona los valores del porcentaje acumulado pasante  $F(x)$  con el tamaño de partícula o abertura de malla de la serie empleada. La ecuación del modelo matemático propuesto es el siguiente.

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right) \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

$F(x)$ : Porcentaje acumulado pasante.

$x$ : Tamaño de partícula en micrones.

$\beta$ : Módulo de tamaño.

$\alpha$ : Módulo de distribución.

---

## 5. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del proyecto se utilizó una metodología encaminada a cumplir los objetivos propuestos, la cual permite gestionar y planificar las actividades a realizar en orden lógico y secuencial.

### 5.1. Consulta, revisión y análisis bibliográfico

En este proyecto se realizó una exhaustiva documentación y revisión bibliográfica con el objetivo de tener información para la experimentación, se buscaron en bases de datos artículos académicos, patentes, tesis, trabajos de grados, revistas; lo cual permitió identificar avances y condiciones para llevar a cabo el proyecto. Lo más relevante en la búsqueda bibliográfica fueron las condiciones de operación más utilizadas y efectivas en diferentes investigaciones relacionadas con la implementación de tratamientos o pretratamientos con ultrasonido a la caliza o materiales similares los cuales se podrían implementar o en su defecto realizar una adaptación dentro del proyecto de investigación.

### 5.2. Selección y caracterización del material.

La selección del material se realizó de acuerdo con la demanda industrial y a la importancia del tamaño de la partícula. Directa o indirectamente, es probable que la roca caliza se emplee en más industrias que ninguna otra sustancia natural[20]. Como se mencionó en páginas anteriores la caliza se utiliza un 80 % en la manufactura del cemento y para su producción por vía seca, las características físicas más importantes de la caliza son el tamaño y la dureza. El tamaño de la partícula es muy importante en el proceso de clinkerización ya que se trata de reacciones en estado sólido donde es muy importante el área de transferencia que es función del tamaño[1].

Se emplearon algunas técnicas para caracterizar el material y determinar las propiedades del material entre las cuales están:

- 
- **Densidad:** la densidad es una propiedad intensiva de la materia. Cada sustancia presenta una densidad que no depende de la cantidad de materia que la constituya. Para la determinar la densidad se utilizó el método del picnómetro el cual tiene un volumen constante y se cierra por medio de un tapón en el que hay un pequeño agujero que permite eliminar el aire de manera que la cantidad contenida en el picnómetro sea constante después de terminar la operación de llenado.
  - **Análisis granulométrico:** se realiza mediante el tamizado de la muestra. Este permite conocer el tamaño de las diferentes partículas que componen el material a analizar. El análisis por tamizado forma parte de los métodos mecánicos para conocer la granulometría y permite mostrar la distribución de partículas en la curva granulométrica[21].

Utilizando la normativa internacional ASTM D422 se realizó el análisis granulométrico y a partir de la curva se determinaron dos importantes indicadores que permitieron caracterizar el material. En la figura 7 se puede observar tipos de curvas granulométricas para un posterior análisis de sus coeficientes.

### 5.3. Coeficiente de uniformidad ( $C_u$ )

Representa la extensión de la curva granulométrica, es decir, a mayor extensión de esta curva, se tendrá una mayor variedad de tamaños, lo que es propio de un suelo bien graduado. A partir de la Ecuación 8 es posible determinar este coeficiente; generalmente para un suelo con  $C_u > 4$  cumple que es bien graduado[22].

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Ecuación 8

Donde:

$C_u$ : Coeficiente de uniformidad.

$D_{10}$ : Diámetro correspondiente al 10% de finos en la curva de distribución granulométrica.

$D_{60}$ : Diámetro correspondiente al 60% de finos en la curva de distribución granulométrica.

#### 5.4. Coeficiente de curvatura ( $C_c$ )

Trata de indicarnos una curva granulométrica constante, sin escalones; esto cumple tanto en arenas como gravas cuando  $1 > C_c < 3$ . Utilizando la Ecuación 9 es posible determinar el coeficiente de curvatura[22].

Por lo tanto, ambos coeficientes de uniformidad y curvatura sirven para indicarnos de una manera práctica y sencilla en el laboratorio cuando un suelo se encuentra bien gradado o mal gradado.

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

$C_c$ : Coeficiente de curvatura.

$D_{30}$ : Diámetro correspondiente al 30% de finos en la curva de distribución granulométrica.

## Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

37

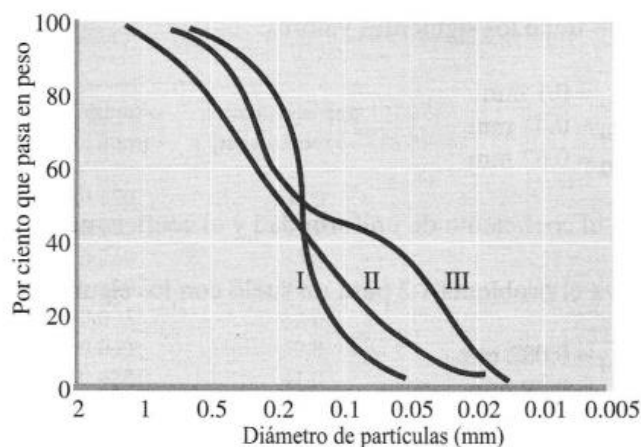


Figura 7. Tipos diferentes de curvas granulométricas.

Nota: Fuente <https://tinyurl.com/2mkjvv55>

La curva I representa un tipo de suelo en el que la mayoría de los granos son del mismo tamaño y se le llama suelo mal graduado. La curva II representa un suelo en el que los tamaños de las partículas están distribuidos sobre un amplio rango y se le llama bien graduado. Un suelo puede tener una combinación de dos o más fracciones uniformemente graduadas. La curva III representa tal suelo y se llama granulometría discontinua.[23]

### 5.5. Determinación de condiciones de operación

En la determinación de las condiciones de operación para el pretratamiento ultrasónico de la caliza, se realizó la búsqueda bibliográfica necesaria, de la cual se pudo concluir que el tiempo de exposición de la muestra en el ultrasonido y la relación másica entre el medio de transmisión de ondas ultrasónicas (agua) y material (caliza) son las variables más determinantes a la hora de realizar la experimentación de una manera efectiva.

La selección de los valores utilizados se realizó en base a la evidencia literaria donde excesivos tiempos de tratamiento ultrasónico no son recomendados[24]. En la tabla 2 se muestran los valores de los experimentos con su conjunto de parámetros y condiciones utilizados para determinar la

Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

38

condición óptima en la determinación de la velocidad específica de fractura y en la tabla 3 se muestran los valores de los parámetros y condiciones utilizados en la experimentación donde se logró determinar la anteriormente mencionada velocidad específica de fractura. La experimentación se realizó por duplicado con el fin de mejorar la confiabilidad de los resultados.

TABLA 2. Parámetros y condiciones molienda en seco y húmedo.

	<b>Molienda seca</b>	<b>Molienda húmeda</b>
<b>% llenado del molino</b>	40	
<b>Tiempo de exposición (min)</b>	0	
	2,5	
	10	
<b>Tiempo de molienda (min)</b>		1

TABLA 3. Parámetros y condiciones para determinación de velocidad específica de fractura con y sin exposición a ultrasonido.

	<b>Molienda seca</b>	<b>Molienda húmeda</b>
<b>% llenado del molino</b>	40	
<b>Tiempo de exposición (min)</b>	10	
	10/14	
<b>Malla</b>	14/16	
	16/20	
	0	
<b>Tiempo de molienda (min)</b>	0,5	
	1	
	2	
	3	

---

### 5.6. Preparación de muestras

Se realizó un cuarteo de acuerdo con la NTC 3674 sobre una cantidad considerable de caliza poniendo la muestra original sobre una superficie dura, limpia y nivelada en la cual no pueda presentarse pérdida del material o adición accidentalmente de un material diferente. En la figura 8 se muestran las muestras preparadas.



*Figura 8. Muestra de caliza preparada.*

### 5.7. Ensayos ultrasonido

El equipo ultrasónico utilizado para realizar el proceso de exposición, Figura 9 fue el ELMA ULTRASONIC LC30H con una capacidad máxima de 2,7 L donde se recomienda llenar hasta 2/3 de su capacidad máxima, sus dimensiones externas corresponden a 240 mm de longitud, 137 mm de ancho y 100 mm de altura. Potencia de 240 W y frecuencia ultrasónica constante de 35 kHz[25].

Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

40



*Figura 9. ELMA ULTRASONIC LC30H.*

La cantidad de material recomendado a exponer en el equipo es máximo la mitad de la altura externa del dispositivo y se afora con agua hasta la altura recomendada. La eficiencia de la sonicación no depende de la cantidad de masa expuesta[26].

Para la sonicación de las muestras a utilizar en la molienda en seco se dividió la cantidad de material y se realizaron dos procedimientos para exponer la muestra con el objetivo de garantizar que el sólido no superará la cantidad recomendada la cual es la mitad de la altura del exterior del equipo generador de ultrasonido, mientras tanto para la sonicación de las muestras del material para utilizar en la molienda en húmedo se añadió todo el material al equipo de ultrasonido y en una sola irradiación de ondas estacionarias, directas y en continuo con una frecuencia de 35 kHz se realizó la parte experimental. En la figura 10 se muestra el equipo de ultrasonido cargado con material para la exposición.



Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

41



*Figura 10. Ultrasonido cargado con material.*

### **5.8. Secado de material pretratado**

Después del pretratamiento del material se retira la mayor cantidad de agua posible y se deposita en un recipiente de aluminio para llevar al horno a 110°C, por el tiempo necesario para evaporar la humedad presente en el material, esto para realizar la parte experimental de molienda en seco. figura 11 se muestra el horno utilizado para secar las muestras.



*Figura 11. Horno y material secado.*

---

### 5.9. Descripción molino de bolas

El molino de bolas que se utilizó para realizar los ensayos de molienda después de que el material se haya sometido a un pretratamiento de ultrasonido es de acero inoxidable donde durante un minuto y por duplicado se realizó la molienda. Las demás características del molino se encuentran en la Tabla 4.

### 5.10. Determinación de fracción de llenado

La acción de volteo de la carga y las velocidades de ruptura depende claramente de qué proporción del volumen del molino está lleno con bolas[6]. La fracción de llenado se expresa, convencionalmente, como la fracción del molino lleno por el lecho de bolas en el reposo, es decir, es la proporción del volumen interno del molino que ocupa la carga y elementos moledores. A continuación, se muestra el modelo de cálculo que permite obtener la fracción de llenado.

$$J = \frac{\text{Volumen real de bolas/Fracción en volumen de acero en el lecho}}{\text{Volumen del molino}} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$J = \left( \frac{\text{masa de bolas/densidad de bolas}}{\text{Volumen del molino}} \right) \times \left( \frac{1}{1 - \text{Porosidad del lecho}} \right) \quad \text{Ecuación 11}$$

Se considera la porosidad nominal del lecho constante y equivale al valor de 0.4, por lo que la Ecuación 11 se transforma de la siguiente manera.

Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

43

---

$$J = \left( \frac{\text{masa de bolas/densidad de bolas}}{\text{Volumen del molino}} \right) \times \left( \frac{1}{0.6} \right) \quad \text{Ecuación 12}$$

Similarmente, la carga de polvo de un molino se expresa como la fracción del volumen del molino ocupada por el lecho de polvo,  $f_c$ . Usando nuevamente una porosidad nominal del lecho de polvo de 0,4 como se muestra a continuación.

$$f_c = \left( \frac{\text{masa de polvo/densidad de polvo}}{\text{Volumen del molino}} \right) \times \left( \frac{1}{0.4} \right) \quad \text{Ecuación 13}$$

A fin de relacionar la carga de polvo con la carga de bolas, el volumen aparente de la carga de polvo se compara con la porosidad nominal del lecho de bolas mediante la variable U, que expresa la fracción de huecos entre las bolas en reposo ocupada por el lecho de partículas.

$$U = \frac{f_c \times \text{Volumen de molino}}{J \times \text{Volumen de molino} \times \text{Porosidad lecho de bolas}} = \frac{f_c}{0.4 J} \quad \text{Ecuación 14}$$

Empíricamente se ha encontrado que el rango de U de 0.6 a 1.1 es una buena proporción de polvo a bolas para dar una fractura eficiente en el molino.

Teniendo en cuenta las expresiones matemáticas anteriores es posible encontrar el volumen de llenado, el volumen ocupado por el polvo, número de bolas, el peso total de material, peso total de bolas al interior del molino y la velocidad actual que es aproximadamente el 80 % de la velocidad crítica es decir el 80% del resultado de la Ecuación 1.

Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

44

TABLA 4. Especificaciones del molino.

<b>Molino</b>	
Diámetro interno (cm)	20
Longitud (cm)	20
Material	Acero inoxidable
Volumen total (cm <sub>3</sub> )	6283,19
Densidad (g/cm <sub>3</sub> )	7,85
Fracción de llenada	0,30
Volumen total de bolas (cm <sub>3</sub> )	1130,97
Llenado de polvo	0,12
Porosidad de lecho de bolas	0,40
Peso inicial de llenado (g)	907,79
<b>Internos (Bolas)</b>	
Diámetro de bola (cm)	2,54
Peso de bola (g)	67,35
Volumen de bola (cm <sub>3</sub> )	8,58
Densidad de bola (g/cm <sub>3</sub> )	7,85
Material	Acero inoxidable
Peso de bolas totales (g)	8877,49
Número de bolas totales	132,00

### 5.11. Ensayos molienda

Se realizaron dos tipos de ensayos de molienda en húmedo y en seco. Para los ensayos de molienda en seco se dispuso del material que se secó previamente en el horno para molerlo agregándolo en el molino en dos tandas precedidas por los internos para que al momento de moler se diera una homogeneización y uniformidad del material de manera más rápida al momento de la molienda la cual se realizó durante un minuto. Para los ensayos de molienda en húmedo se dispuso del material inmediatamente después de realizar el pretratamiento de ultrasonido y ajustando previamente antes de agregar al molino la cantidad de agua faltante para que la pulpa presentará la humedad requerida. Similarmente a los ensayos en seco el material es agregado en dos tandas precedido de los internos del molino para una mayor homogeneidad al momento de la molienda la cual se realizó durante un minuto.

## Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

45

Después de realizar la molienda en húmedo es necesario descargar el material del molino y asegurar que en los internos no se retiene material, luego se procede a secar el material en el horno para posteriormente realizar un análisis granulométrico.

### 5.12. Caracterización Granulométría

Después de la molienda se utiliza una serie de tamices (mallas) identificadas con los números: N.º 14, 16, 20, 25, 30, 35, 40, 60, 80, 100 y 140 también un colector como se muestra en la figura 12; posterior a la descarga del material del molino se realizó un cuarteo como se explicó en el ítem 7.4 y se tomó una muestra aproximadamente de 100 gramos y se dispuso en el Ro-Tap durante un tiempo de 4 minutos, este equipo por medio de vibraciones y movimientos rotatorios se encarga de separar las partes finas de las gruesas del material en cada una de las mallas presentes en la serie de tamices. Este procedimiento se realizó con la finalidad de obtener las condiciones óptimas del ultrasonido a partir de la curva del análisis granulométrico y la comparación con la muestra sin pretratamiento (blanco). El procedimiento experimental se realizó por duplicado con el fin de mejorar la confiabilidad de los resultados.



Figura 12. Serie de tamices utilizados en la caracterización granulométrica.

### 5.13. Obtención de monotamaños

La obtención de los monotamaños se realizó con la finalidad de tener la totalidad de las muestras para la posterior determinación de la velocidad específica de fractura; se tomaron pequeñas cantidades de material (100 gramos) aproximadamente del alimento sin una previa molienda y sin ser expuesto a ultrasonido y se tamizó en la serie de tamices N.º 10-14-16-20 durante 4 minutos en el Ro-Tap y se separaron los monotamaños retenidos en la malla N.º 14, 16 y 20 para los posteriores experimentos.

### 5.14. Preparación de la pulpa

Si hay agua presente, la densidad de la suspensión se puede cuantificar mediante la fracción en peso de los sólidos en la mezcla  $c_p$ . En realidad, las propiedades reológicas de una suspensión quedan mejor definidas por la fracción de sólido en volumen  $c_v$  [6].

A partir de la ecuación 15 se puede determinar la cantidad de sólido y agua a adicionar para la preparación de la pulpa, para ello se requiere que el porcentaje de llenado del molido sea solo 40 % y la fracción de sólido sea del 60 %. Después de realizar los cálculos respectivos se obtiene que para preparar la pulpa con las condiciones antes mencionadas es necesario agregar 545 g de sólido y 121 g de agua.

$$c_v = \frac{\frac{c_p}{\rho_s}}{\frac{c_p}{\rho_s} + [(1 - c_p)/\rho_l]}$$

Ecuación 15

Donde:

Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

47

---

$c_p$ : Es la fracción en peso del sólido.

$\rho_s$ : Es la densidad del sólido.

$\rho_l$ : Es la densidad del líquido.

### **5.15. Determinación de velocidades específicas de fractura**

A partir de los parámetros y condiciones de operación tabulados en la sección 7,3 y la sección 7,11, se definió que las condiciones óptimas de operación eran 10 minutos de tiempo de exposición a ultrasonido y relación másica de 4.5 masa de caliza/masa de agua para la pulpa de alimento al molino y moliendas de 0.5, 1, 2, y 3 minutos a partir de dichas condiciones se procedió a determinar la velocidad específica de fractura, tomando tres grupos de monotamaños siendo estos relativos a las mallas N.º 10/14, 14/16 y 16/20.

Después de realizar el procedimiento anteriormente descrito se secaron las muestras molidas y se descargaron en las mallas 14, 16, y 20 que corresponden a los tamaños de 1400, 1180 y 850 micrómetros respectivamente las cuales eran las mallas que retenían la cantidad de monotamaños utilizados para la molienda, se llevaron al Ro-Tap por un tiempo de 4 minutos y se procedió a pesar el material retenido en las mallas con la finalidad de determinar las velocidades específicas de fractura.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIONES.

### 6.1. Selección y caracterización del material.

La selección y caracterización de la caliza se llevó a cabo como se explicó en el ítem 7.2 los cuales son reportados en la tabla 5 se realizó una distribución granulométrica y posteriormente una curva de análisis granulométrico con dos muestras del alimento (caliza sin pretratamiento y sin moler) de 106,48 gramos y 92,9 gramos donde se determinaron las fracciones máscas del material retenido en las mallas N.º 10, 14, 16, 20, 25, 30, 35, 40, y 60 y posterior promedio de las fracciones retenidas en las dos muestras. Los resultados obtenidos se muestran a continuación en la figura 13.

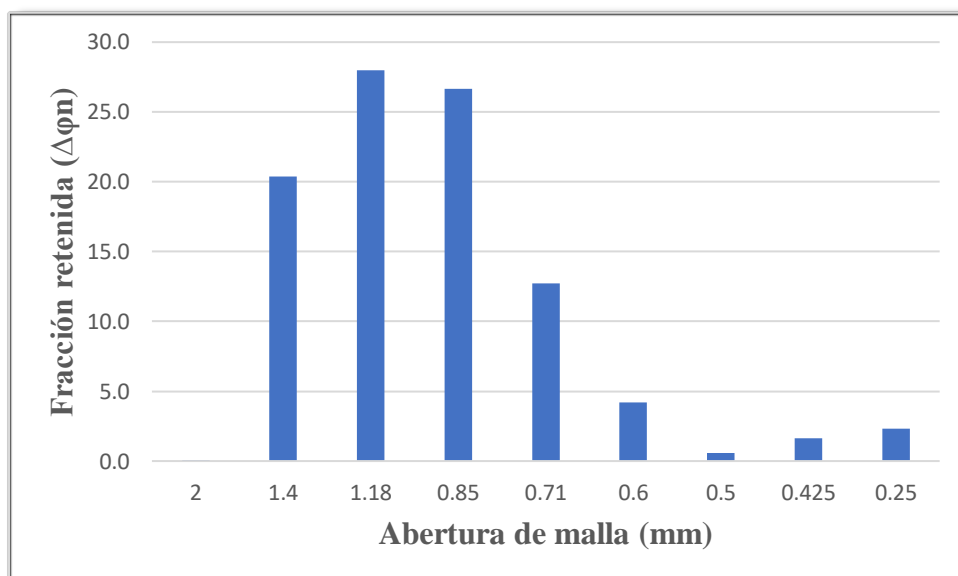


Figura 13. Histograma granulométrica de alimento.

A partir de la distribución granulométrica del alimento es posible graficar la curva de análisis granulométrico representada en la figura 14 y por métodos matemáticos, determinar los coeficientes de uniformidad y curvatura reportados en tabla 5 y a su vez utilizar modelos matemáticos como el modelo Gates-Gaudin-Schuhmann (G-G-S) o el modelo Rosin-Rammler (R-



Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

49

R) explicados en el ítem 5.13 y 5.14 respectivamente para determinar un parámetro se suma importancia como lo es el  $F_{80}$ , el cual es el tamaño de la malla por el cual es capaz de pasar el 80 % del pasante acumulado o cernido del alimento. Para el presente caso de estudio se seleccionó el modelo Gates-Gaudin-Schuhmann (G-G-S) debido que, al realizar el modelamiento matemático de la granulometría del material presentó un coeficiente de determinación mayor, el cual se muestra en la Figura 15 y obtenido a partir de la Ecuación 16.

$$F(x) = 100 * \left( \frac{x}{1857,27} \right)^{1,87}$$

Ecuación 16

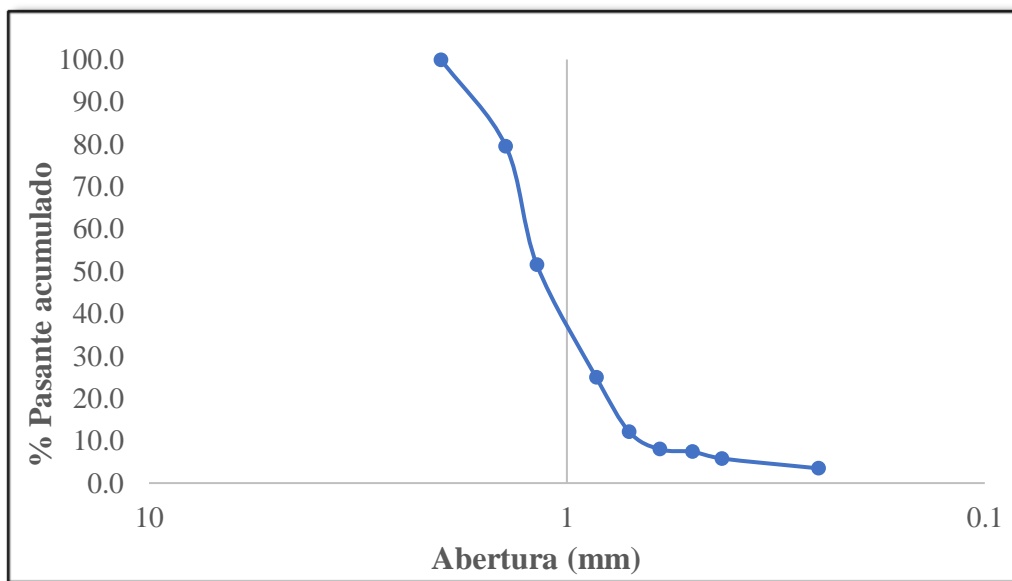


Figura 14. Análisis granulométrico correspondiente al alimento.

Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

50

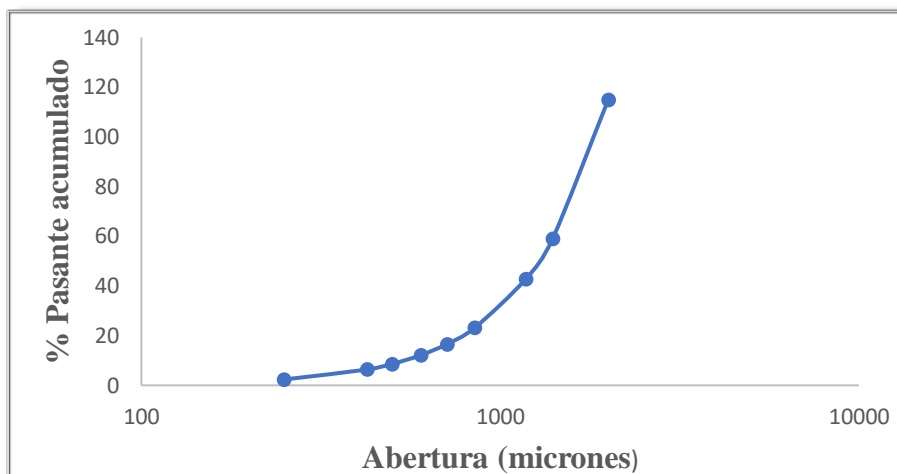


Figura 15. Modelo Gates-Gaudin-Schuhmann para muestra de alimento.

Utilizando los valores obtenidos a partir del modelo matemático representado por la figura 15 es posible obtener el parámetro  $F_{80}$ .

TABLA 5. Caracterización del material.

<b>Densidad (g/ml)</b>	3,01
<b>Coefficiente de uniformidad</b>	1,91
<b>Coefficiente de curvatura</b>	1,06
<b><math>F_{80}</math> (micrones)</b>	1648,17

De los valores reportados en la tabla 5 se puede asegurar que el material es mal graduado y es posible confirmarlo por la poca extensión en el eje x de la curva representada por la figura 14, además es una curva granulométrica constante.

## 6.2. Determinación de condiciones de operación.

Como se mencionó anteriormente en la sección 5.5 y se mostró en la tabla 2, se reportaron los resultados obtenidos en la figura 16 y 17 para la molienda en seco y en la figura 18 y 19 se observan los resultados obtenidos para la molienda en húmedo con los respectivos parámetros y condiciones experimentales.

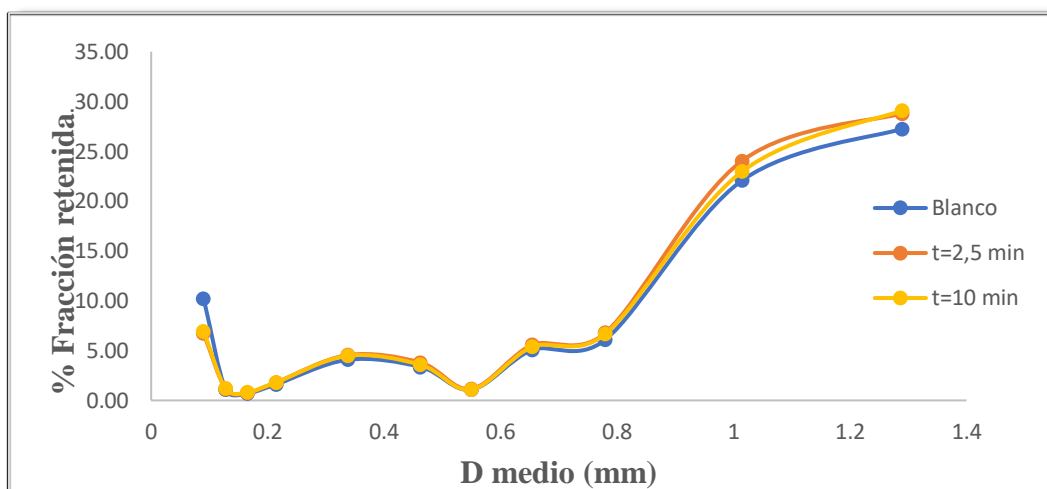


Figura 16. Análisis granulométrico diferencial para el blanco y muestras con pretratamiento de ultrasonido de 2.5 y 10 minutos con molienda en seco.

Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

52

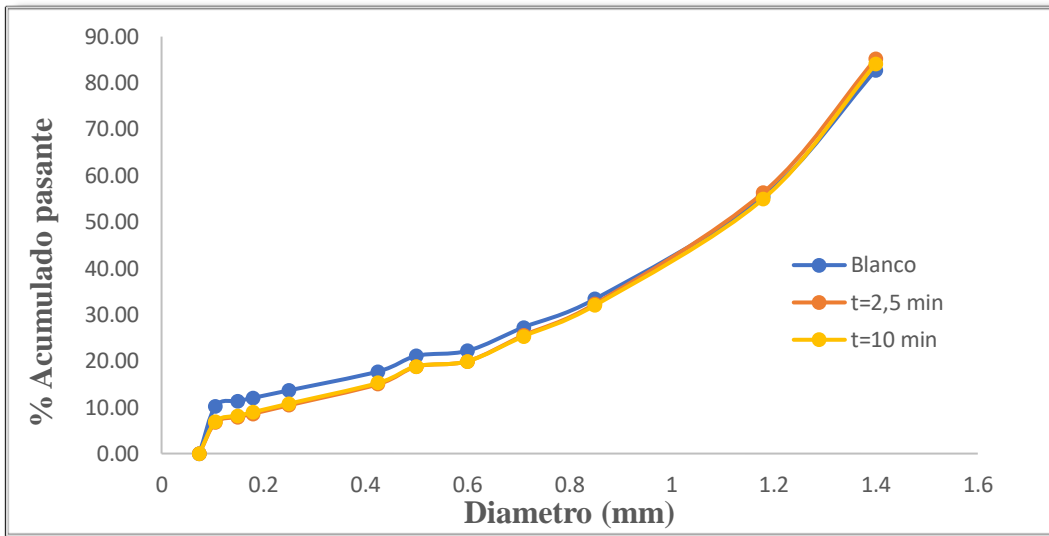


Figura 17. Análisis granulométrico acumulado para el blanco y muestras con pretratamiento de ultrasonido de 2.5 y 10 minutos con molienda en seco.

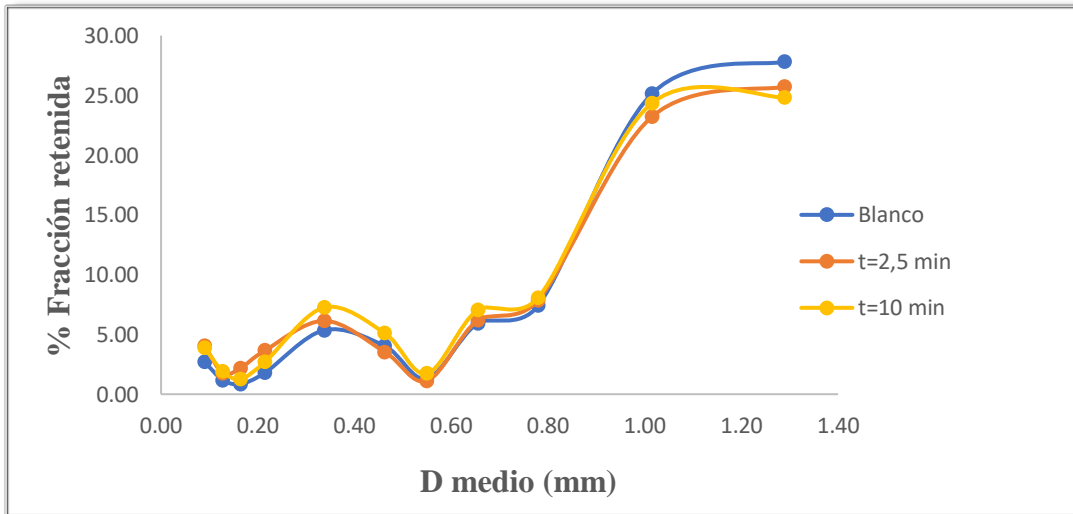


Figura 18. Análisis granulométrico diferencial para el blanco y muestras con pretratamiento de ultrasonido de 2.5 y 10 minutos con molienda en húmedo.

Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

53

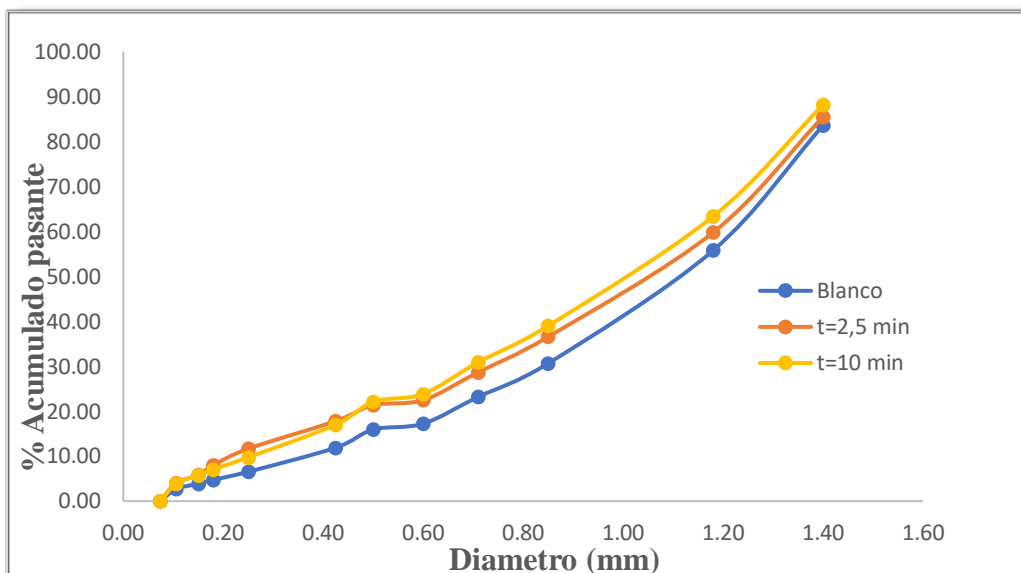


Figura 19. Análisis granulométrico acumulado para el blanco y muestras con pretratamiento de ultrasonido de 2.5 y 10 minutos con molienda en húmedo.

A partir de la figura 17 y 19 las cuales reportan los análisis granulométricos acumulados para las muestras en la molienda en seco y en húmedo respectivamente evidencian claramente que para la molienda en seco con muestras expuestas a ultrasonido no hay mejora en los resultados, es decir el porcentaje acumulado pasante para las muestras expuestas a ultrasonido son muy similares a la muestra blanco, caso contrario sucede en la molienda en húmedo donde las muestras pretratadas con ultrasonido presentan porcentajes de pasante acumulado mayores para diámetros iguales comparándolos con la muestra blanco. Por lo tanto, los resultados anteriormente puntualizados por la reducción del tamaño de partícula en la molienda en húmedo son acordes a lo que normalmente se espera dentro de este tipo de procesos, se reitera como tal, que el proceso de molienda en húmedo con pretratamiento ultrasónico es eficiente en la generación de microfallas en el material, facilitando en si la fractura de la caliza.

---

### 6.3. Consumo energético en ultrasonido

En la determinación de la velocidad específica de fractura se utilizó un pretratamiento con ultrasonido realizando varias pruebas variando el tiempo de exposición de las partículas al ya mencionado tratamiento; utilizando tiempos de 0.5, 1, 2 y 3 minutos.

A partir de lo expuesto en la Ecuación 2 presente en el ítem 5.5, se determinó la energía consumida por el ultrasonido en términos del tiempo de exposición y la cantidad de carga; cuyos resultados se muestran en la tabla 6.

*TABLA 6. Reporte de energía consumida en los ensayos de ultrasonido.*

<b>Tiempo de molienda (min)</b>	<b>Energía consumida (kJ/kg)</b>
0,5	13,21
1	26,42
2	52,84
3	79,27

Partiendo de los resultados obtenidos del consumo energético en el ultrasonido se observó una relación directamente proporcional entre el tiempo de exposición y la energía específica consumida en el proceso. Es un resultado muy importante porque a partir de este, se puede determinar y seleccionar una condición óptima en la cual se pueda obtener mayor rentabilidad y procesos mejorados en la molienda partiendo de un análisis de costos.

Por otra parte, estudios previos concluyeron que exposiciones ultrasónicas en cortos periodos de tiempo además de disminuir la energía requerida, presentan mayor eficiencia y mejores resultados.

### 6.4. Velocidades Específicas de Fractura ( $S_j$ )

La velocidad específica de fractura ( $S_j$ ) fue definida para tres grupos de monotamaños, los cuales hacen referencia específicamente a las mallas 16/20, 20/30 y 40/50 de acuerdo con la explicación

Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

que se dio en ítem 6.15 del presente estudio. En la tabla 7 se reportan los resultados obtenidos en el proceso de la determinación de las velocidades específicas de fractura en los monotamaños, referente a la muestra blanco, a partir de dicha tabla se obtienen la figura 20, 21 y 22 en donde a partir de la ecuación de la recta, se infiere que el valor de la pendiente sobre el logaritmo de Euler se interpreta como la velocidad específica de fractura respectiva para tal caso. A su vez en la tabla 8 se reportan los resultados obtenidos de la determinación de las velocidades específicas de fractura en los monotamaños correspondientes a la muestra con pretratamiento de ultrasonido y a partir de dicha tabla es posible obtener la figura 24, 25 y 26 en donde el valor de la pendiente sobre el logaritmo de Euler se interpreta como la velocidad específica de fractura respectiva. En la figura 23 y 27 se muestra la linealidad de los diferentes monotamaños utilizando la molienda con bolas de una pulgada para las muestras blanco y las muestras con pretratamiento de ultrasonido respectivamente. Gracias a esta linealidad se concluye que es una gráfica de primer orden.

TABLA 7. Valores obtenidos en ensayo para la determinación de la velocidad específica de fractura de la muestra blanco.

Tiempo	Tamaño en micras		
	1400 $\mu\text{m}$	1180 $\mu\text{m}$	850 $\mu\text{m}$
	masa retenida (g)		
0	545	545	545
0,5	268,66	360,895	391,145
1	174,01	258,87	287,515
2	74,435	127,455	158,985
3	41,15	87,77	93,695

Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

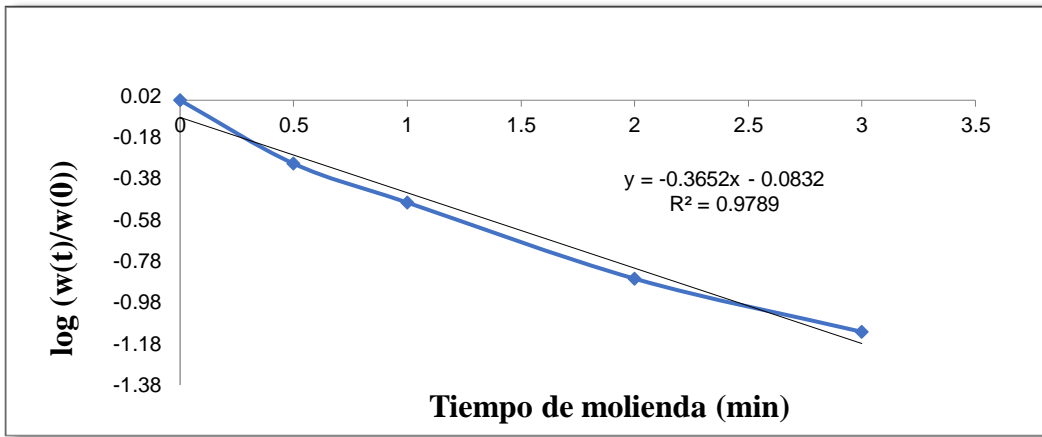


Figura 20. Cinética de fractura de primer orden para monotamaño 10/14 para muestra blanco.

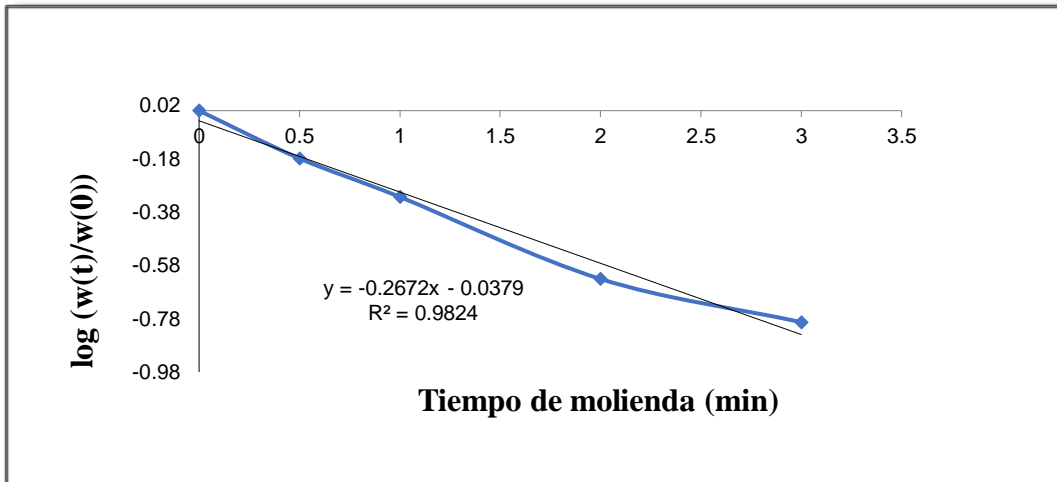


Figura 21. Cinética de fractura de primer orden para monotamaño 14/16 para muestra blanco.



Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

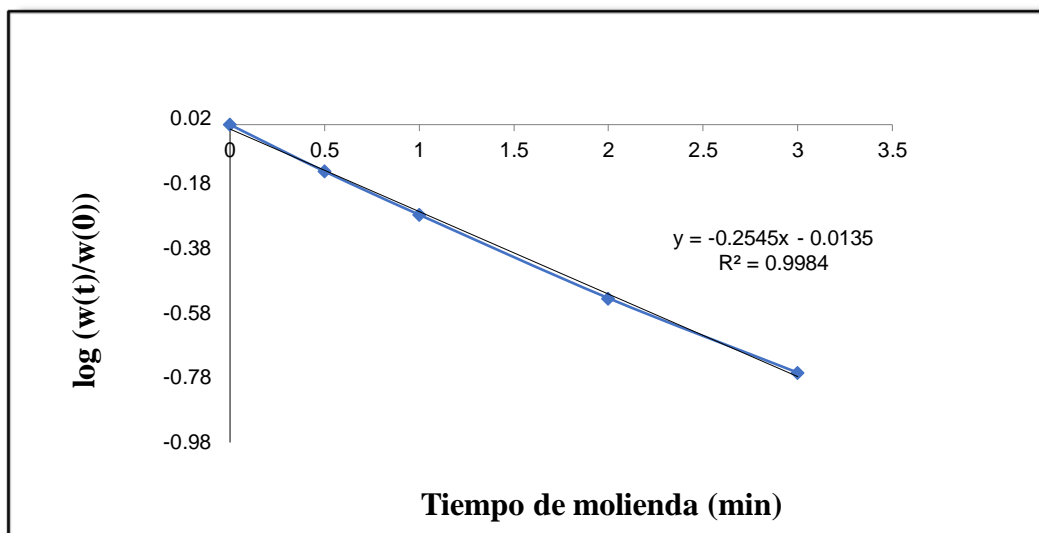


Figura 22. Cinética de fractura de primer orden para monotamaño 16/20 para muestra blanco.

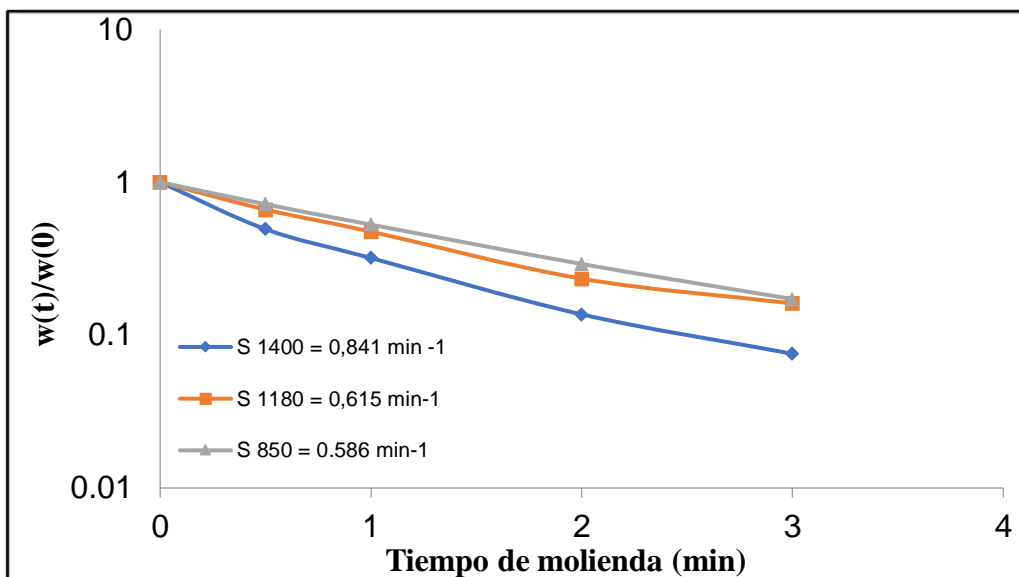


Figura 23. Grafica de primer orden para diferentes monotañanos para la molienda de las muestras blanco.

Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

58

TABLA 8. Valores obtenidos en ensayo para la determinación de la velocidad específica de fractura de la muestra con pretratamiento de ultrasonido.

Tiempo (min)	Tamaño en micras		
	1400	1180	850
masa retenida (g)			
0	545	545	545
0,5	267,42	355,88	393,16
1	172,87	256,03	286,34
2	73,75	129,89	154,99
3	38,63	78,56	93,79

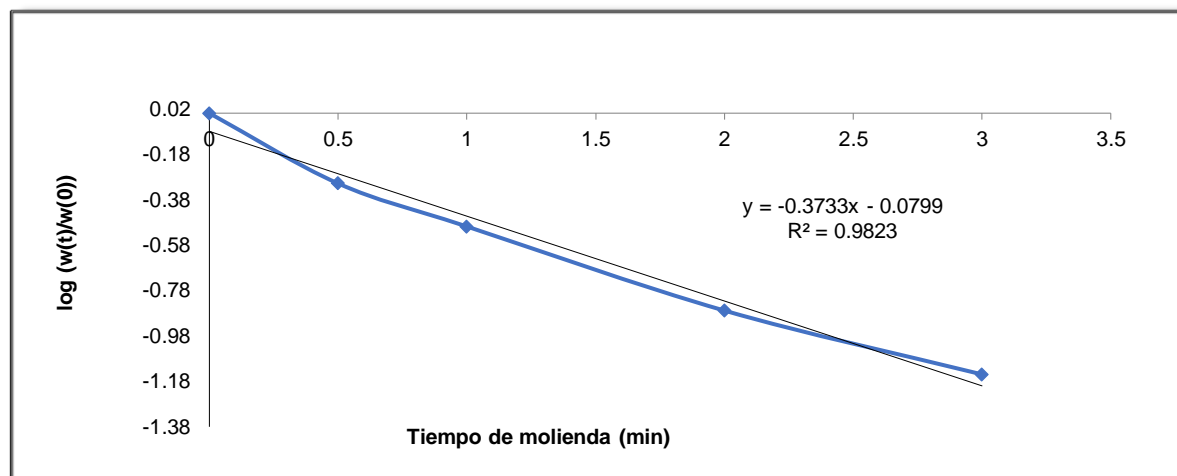


Figura 24. Cinética de fractura de primer orden para monotamaño 10/14 para muestra expuesta a ultrasonido.

Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

59

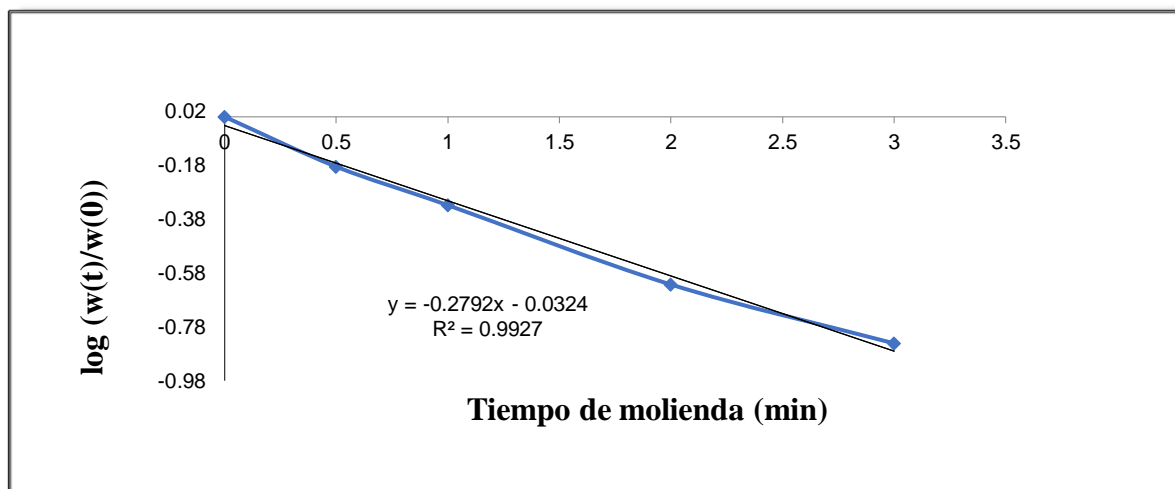


Figura 25. Cinética de fractura de primer orden para monotamaño 14/16 para muestra expuesta a ultrasonido.

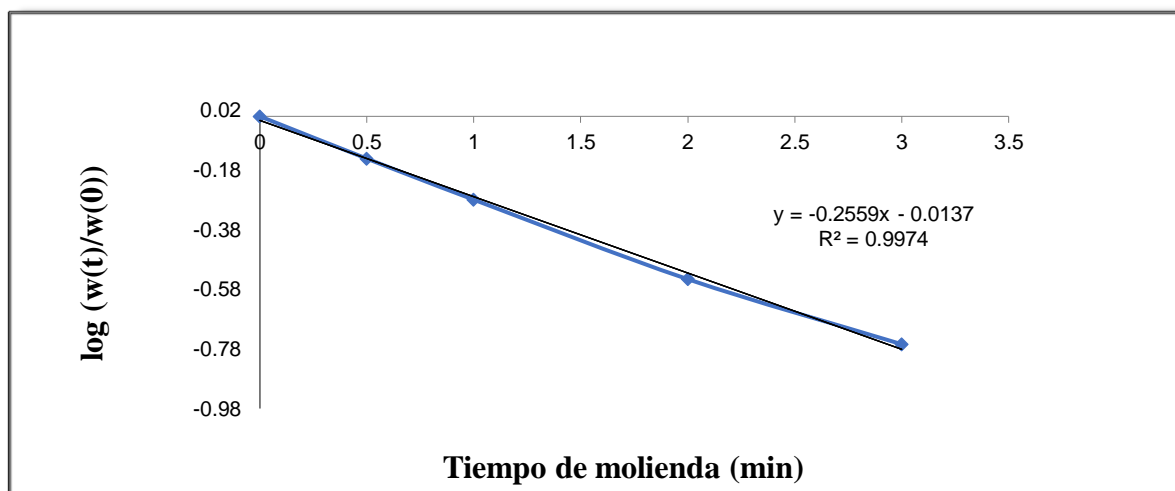


Figura 26. Cinética de fractura de primer orden para monotamaño 16/20 para muestra expuesta a ultrasonido.

Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

60

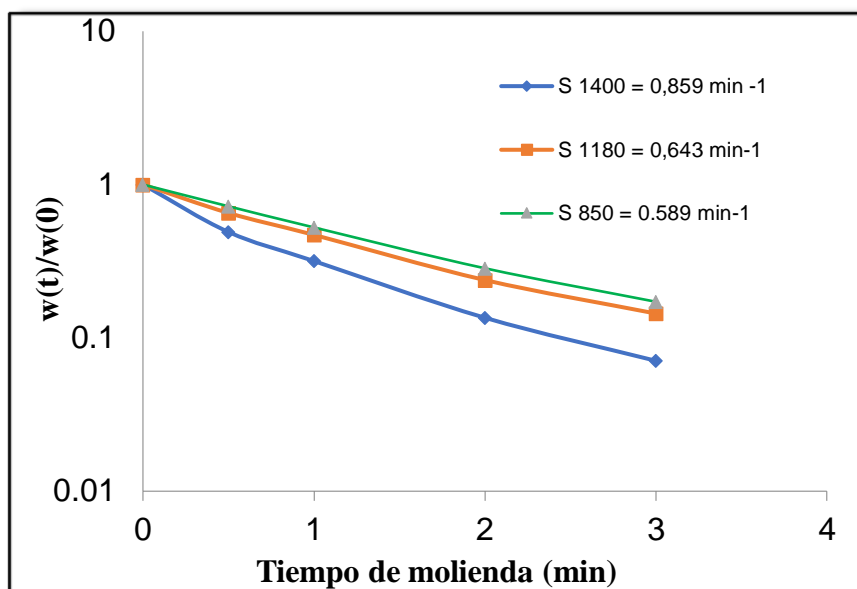


Figura 27. Grafica de primer orden para diferentes monotañanos para la molienda de las muestras asistida con ultrasonido.

En la tabla 9 se reportan las velocidades específicas de fractura obtenidas experimentalmente para las muestras blanco y para las muestras expuestas a ultrasonido. Además, se muestra el porcentaje de mejora logrado a partir del pretratamiento suministrado a las muestras. En la figura 28 se grafica el comportamiento de la velocidad específica de fractura para las muestras utilizadas en la fase experimental donde es posible realizar una comparación y evidenciar que las muestras expuestas a ultrasonido tienen mayor velocidad específica de fractura en cada uno de los monotamaños utilizados.

TABLA 9. Velocidades específicas de fractura de muestra blanco, muestra asistida por ultrasonido en (min<sup>-1</sup>) y % de mejora.

Malla	Tamaño en micras	(Blanco)	(Asistida por ultrasonido)	% de Mejora
10/14	1400	0,841	0,860	2,218
14/16	1180	0,615	0,643	4,491
16/20	850	0,586	0,589	0,550

Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

61

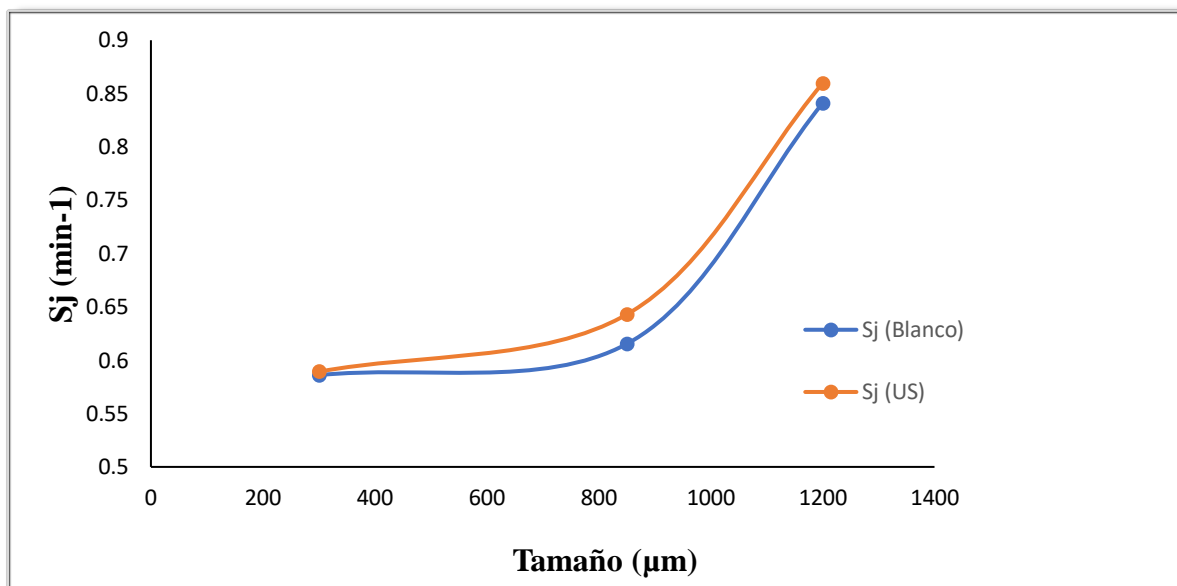


Figura 28. Comparación del comportamiento de la velocidad específica de fractura de las muestras blanco y las muestras asistidas con ultrasonido.

Evaluando el comportamiento de las figuras 20, 21 y 22, en las cuales se muestra el comportamiento de la cinética de fractura de primer orden en monotamaños correspondientes a las mallas 10/14, 14/16 y 16/20 respectivamente de la muestra blanco, se evidencia la linealidad en cada caso estudiado, esto con base al coeficiente de determinación ( $R^2$ ) obtenido en cada gráfica, el cual fue superior a 0,97, esta misma tendencia de comportamiento es evidente en las figuras 24, 25 y 26 las cuales representan cómo se comporta la velocidad específica de fractura de las muestras asistidas con ultrasonido, por tanto la velocidad específica de fractura es posible asociarla a la pendiente de la curva definida como  $\log \frac{w}{w_0}$  vs tiempo de molienda, como se especificó anteriormente al obtenerse la Ecuación 5, donde se infiere entonces que el signo negativo de la pendiente determina el comportamiento de la curva, por lo cual se determina que a medida que el tiempo de molienda incrementa el monotamaño original obtiene un decrecimiento.

Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un molino de bolas asistida con ultrasonido.

62

---

En la tabla 9, la cual describe los resultados de las velocidades específicas de fractura para cada monotamaño, referentes a la muestra blanco y la asistida por el ultrasonido, se evidencia que a medida que el tamaño de partícula en el proceso de molienda disminuye, la velocidad específica de fractura también lo hace, esto es explicable porque al disminuir el tamaño de partícula del material, las grietas de este también se reducen, por tanto, será difícil generar una fractura en ese caso.

Con base al porcentaje de mejora reflejado en la tabla 9, el mayor porcentaje obtenido corresponde a un valor de 4,49 % para una malla 14/16 y el menor porcentaje fue de 0,55 para una malla de 16/20, siendo un porcentaje poco significativo para el proceso, por lo cual se determina que para este número de malla, la moliendabilidad de la caliza es relativamente baja, lo cual quiere decir que posiblemente este material en ese tamaño de partícula que corresponde específicamente a 850  $\mu\text{m}$ , presente condiciones similares a las de un material de tipo continuo. Por ende, para las condiciones a las cuales se está realizando el proyecto no es viable el pretratamiento con ultrasonido para tamaños inferiores a 850  $\mu\text{m}$ .

---

## 7. CONCLUSIONES

En el presente ejercicio investigativo se caracterizó la caliza en término de sus propiedades individuales, logrando identificar algunos parámetros como el coeficiente de curvatura y coeficiente de uniformidad dando como resultados que el material utilizado es mal graduado en términos de su composición en tamaños.

Se demostró que utilizando un pretratamiento de ultrasonido en la molienda de la caliza es posible aumentar la velocidad específica de fractura utilizando diferentes monotamaños y condiciones óptimas encontradas experimentalmente con ayuda de literatura reportada por diferentes investigadores. Realizando una comparación entre las muestras sin exponer a ultrasonido y las muestras expuestas se puede concluir que el ultrasonido efectivamente ayuda a expandir las grietas presentes internamente en el material hacia la superficie y así poder fracturar el material en menor tiempo. Adicionalmente, fue posible evidenciar que la cinética de fractura para la caliza realmente cumple una ley de primer orden y así poder determinar la velocidad específica de fractura para el material utilizando el método de los monotamaños.

Si bien para los monotamaños utilizados durante la experimentación para la determinación de la velocidad específica de fractura dieron resultados favorables teniendo una mejora respecto a las mismas muestras sin ser expuestas a ultrasonido, es importante mencionar que a medida que disminuían los monotamaños de partículas también disminuye la velocidad específica de fractura a tal punto que para los monotamaños correspondientes a la malla de 850 micrómetros el porcentaje de mejora era muy bajo y siguiendo la tendencia es posible concluir que para monotamaños inferiores a los 850  $\mu\text{m}$  no es viable usar pretratamiento con ultrasonido a las condiciones trabajadas. Es importante resaltar que en la parte experimental el equipo utilizado para realizar el pretratamiento de ultrasonido no permitía modificar parámetros tales como frecuencia los cuales podrían ser de utilidad y posiblemente de mejoras en estudios posteriores de futuras investigaciones.

---

## 8. REFERENCIAS

- [1] M. T. Vaca *et al.*, “La Caliza en Colombia geología, recursos, calidad y potencial.” 2012. <https://tinyurl.com/2p9ccubn> (accessed Sep. 10, 2022).
- [2] V. Monov, B. Sokolov, and S. Stoenchev, “Grinding in ball mills: Modeling and process control,” *Cybern. Inf. Technol.*, vol. 12, no. 2, pp. 51–68, 2012, doi: 10.2478/cait-2012-0012.
- [3] A. Somani, T. K. Nandi, S. K. Pal, and A. K. Majumder, “Pre-treatment of rocks prior to comminution – A critical review of present practices,” *Int. J. Min. Sci. Technol.*, vol. 27, no. 2, pp. 339–348, 2017, doi: 10.1016/j.ijmst.2017.01.013.
- [4] B. Velazquez, “Industrias I - 2015 Molienda,” vol. 1, p. 26, 2015, [Online]. Available: <https://tinyurl.com/ycke7adp>
- [5] C. E. Ortiz Rios, “Molienda de bolas en húmedo y en seco con eje excéntrico externo,” 2020, [Online]. Available: <https://tinyurl.com/3h3wp6xm>
- [6] L. G. AUSTIN and F. CONCHA A, *Diseño y Simulación De Circuitos De Molienda y Clasificación*. PROGRAMA IBEROAMERICANO DE CIENCIA Y TECNOLOGIA PARA EL DESAROLLO, 1994.
- [7] L. A. Ríos, “Tratamiento de ultrasonido para mejorar la flotabilidad de minerales sulfurados de mina rafaela,” UNIVERSIDAD DE CHILE, 2022.
- [8] L. F. Gaete-Garretón, Y. P. Vargas-Hermández, and C. Velasquez-Lambert, “Application of ultrasound in comminution,” *Ultrasonics*, vol. 38, no. 1, pp. 345–352, 2000, doi: 10.1016/S0041-624X(99)00170-5.
- [9] D. S. Franco Álvarez and J. S. Rodríguez Martínez, “Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de coque metalúrgico asistida por ultrasonido,” 2021.
- [10] F. M. Katubilwa and M. H. Moys, “Effect of ball size distribution on milling rate,” University of the Witwatersrand, 2009.
- [11] R. P. King, *Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems*, Butterwort. 2001.
- [12] Y. Xiao *et al.*, “Particle breakage and energy dissipation of carbonate sands under quasi-static and dynamic compression,” *Acta Geotech.*, vol. 14, no. 6, pp. 1741–1755, 2019, doi:



---

10.1007/s11440-019-00790-1.

- [13] O. Y. Toraman and H. İnal, “Preparation of submicron calcite particles by combined wet stirred media milling and ultrasonic treatment,” *Part. Sci. Technol.*, vol. 35, no. 6, pp. 627–631, 2017, doi: 10.1080/02726351.2016.1192571.
- [14] Y. Vargas-Hernández, L. Gaete-Garretón, V. Peña-Latorre, A. Chamayou, and F. Montoya-Vitini, “Efectos de la cavitación acústica sobre la molienda de partículas en suspensión.” [Online]. Available: <https://digital.csic.es/bitstream/10261/6949/1/ult19.pdf>.
- [15] V. Singh, R. Venugopal, V. K. Saxena, and A. K. Mukherjee, “Study of the effect of ultrasonic treatment on mineral materials of different morphologies,” *Miner. Metall. Process.*, vol. 33, no. 2, pp. 88–96, 2016, doi: 10.19150/mmp.6626.
- [16] L. Gaete-Garretón, Y. Vargas-Hernandez, A. Chamayou, J. A. Dodds, W. Valderama-Reyes, and F. Montoya-Vitini, “Development of an ultrasonic high-pressure roller press,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 58, no. 19, pp. 4317–4322, 2003, doi: 10.1016/S0009-2509(03)00281-1.
- [17] S. Leibtag, “Ultrasonic Dispersing and Wet-milling of Calcium Carbonate (CaCO<sub>3</sub>),” 2016. <https://tinyurl.com/mu8py8tf> (accessed Sep. 10, 2022).
- [18] V. Singh, P. Dixit, R. Venugopal, and K. B. Venkatesh, “Ore Pretreatment Methods for Grinding: Journey and Prospects,” *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.*, vol. 40, no. 1, pp. 1–15, 2019, doi: 10.1080/08827508.2018.1479697.
- [19] S. O. Adewuyi, H. A. M. Ahmed, and H. M. A. Ahmed, “Methods of ore pretreatment for comminution energy reduction,” *Minerals*, vol. 10, no. 5, 2020, doi: 10.3390/min10050423.
- [20] “La piedra caliza en la industria de la construcción | QuimiNet.” <https://tinyurl.com/de29kave> (accessed Sep. 10, 2022).
- [21] “¿Cómo se hace un análisis granulométrico? – Blog especializado en noticias de construcción minería y metalurgia | HLC.” <https://tinyurl.com/2p8kt5yn> (accessed Sep. 10, 2022).
- [22] M. A. D. Pardavé, “ANÁLISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO POR SEDIMENTACIÓN,” p. 44, 2005, [Online]. Available: <http://www.lem.uni.edu.pe/cefcic/archivos/Clasificacion de suelos - MAD.pdf>.

Determinación de las velocidades específicas de fractura en la molienda de caliza en un  
molino de bolas asistida con ultrasonido.

66

- 
- <https://tinyurl.com/2mkjvv55> [23] “Depósitos de suelos y análisis granulométrico.” (accessed Sep. 21, 2022).
- [24] S. D. Barma, “Ultrasonic-assisted coal beneficiation: A review,” *Ultrason. Sonochem.*, vol. 50, no. August, pp. 15–35, 2019, doi: 10.1016/j.ultsonch.2018.08.016.
- [25] “Transsonic Ultrasonic Cleaning Units.” New Lynn, Auckland, Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: [www.techspanonline.com](http://www.techspanonline.com).
- [26] Elmasonic, “Elmasonic P 30 H,” vol. 49, no. 0, p. 78224, [Online]. Available: <https://tinyurl.com/yc8yfnp4>